



Aalto-yliopisto

Sähkötekniikan korkeakoulu

Otso Mäki

Sähkönsiirtojärjestelmien matalataajuisten tehoheilahtelujen vaimentaminen keskitetyillä ja hajautetuilla säätöalgoritmeilla

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 27.11.2013

Valvoja: Dosentti Kai Zenger

Ohjaajat: DI Janne Seppänen, Dr. Nand Kishor

AALTO-YLIOPISTO TEKNIKAN KORKEAKOULUT PL 12100, 00076 Aalto http://www.aalto.fi		DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ	
Tekijä: Otso Mäki			
Työn nimi: Sähkönsiirtojärjestelmien matalataajuisten tehoheilahtelujen vaimentaminen keskitetyillä ja hajautetuilla säätöalgoritmeilla			
Korkeakoulu: Sähkötekniikan korkeakoulu			
Laitos: Automaatio- ja systeemitekniikan laitos			
Professuuri: Systeemitekniikka		Koodi: AS-74	
Työn valvoja: Dosentti Kai Zenger Työn ohjaaja(t): DI Janne Seppänen Dr. Nand Kishor			
<p> Sekä normaalin toiminnan aikana että vikojen seurauksena sähkönsiirtojärjestelmissä voi esiintyä alueiden välisiä heilahteluja, joissa järjestelmän eri alueiden generaattorit heilahtelevat toisiaan vasten tahtinopeuksiensa ympärillä. Heilahtelut voivat heikentää verkon siirtokapasiteettia ja saattavat vaarantaa sen stabiilisuuden, joten niiden tehokas vaimentaminen on erittäin tärkeää järjestelmän toiminnan kannalta. </p> <p> Tämän työn tavoitteena oli tutkia kuinka alueiden välisiä tehoheilahteluja voidaan vaimentaa käyttämällä keskitettyjä säätöalgoritmeja. Perinteisesti heilahtelujen vaimentamiseen on käytetty paikallisia säätimiä, joissa takaisinkytkentään käytettävä mittausta otetaan ohjattavasta generaattorista. Laaja-alaisen mittausjärjestelmien kehittyminen on kuitenkin mahdollistanut eri puolilla verkkoa samanaikaisesti tehtyjen mittausten hyödyntämisen keskitetyissä säätöalgoritmeissa. Tässä työssä keskitettyjen säädinten muodostamiseen käytettiin LQR-säätöalgoritmia (Linear Quadratic Regulator), ja niitä käytettiin yhdessä paikallisten säädinten kanssa siten, että keskitetty säädin tuotti paikallista säädintä tukevan ohjaussignaalin. </p> <p> Keskitettyjen säätöalgoritmien tehokkuutta tarkasteltiin kahden verkkomallin avulla. Ensimmäinen malli oli kahdesta alueesta koostuva neljän generaattorin sähkönsiirtojärjestelmän malli. Toisena mallina käytettiin Uuden-Englannin ja New Yorkin sähkönsiirtojärjestelmän 16 generaattorin mallia. Keskitettyjen säädinten suorituskykyä tutkittiin järjestelmien lineaaristen tilaesitysten sekä epälineaaristen aikatazon simulaatioiden avulla. Säädinten robustisuuden analysointia varten lineaarinen analyysi ja simulaatiot suoritettiin useissa verkon toimintapisteissä käyttämällä samaa säädintä. Tulosten vertailukohdaksi valittiin tilanne, jossa käytettiin pelkästään paikallisia säätimiä. </p> <p> Lineaarisen analyysin perusteella keskitetyillä säätimillä ohjatussa järjestelmässä alueiden väliset heilahtelut vaimentuivat tehokkaammin kuin käytettäessä pelkkiä paikallisia säätimiä. Simulaatioiden avulla havaittiin kuitenkin, että säätimen suorituskyky heikkeni järjestelmän toimintapisteen ja verkon topologian muuttuessa. Näin ollen tulevaisuudessa on keskeistä tutkia, kuinka säätimet voivat adaptoitua järjestelmässä tapahtuviin muutoksiin. </p>			
Päivämäärä: 27.11.2013		Kieli: Suomi	
		Sivumäärä: 8 + 72 + 21	
Avainsanat: Sähkönsiirtojärjestelmät, LQR, WAMS, värähtely			

AALTO UNIVERSITY SCHOOLS OF TECHNOLOGY PO Box 12100, FI-00076 AALTO http://www.aalto.fi		ABSTRACT OF THE MASTER'S THESIS	
Author: Otso Mäki			
Title: Centralized and local algorithms for damping low frequency power oscillations			
School: School of Electrical Engineering			
Department: Department of Automation and Systems Technology			
Professorship: Control Engineering		Code: AS-74	
Supervisor: Kai Zenger, Docent, D. Sc. (Tech) Instructor(s): Janne Seppänen, M. Sc. (Tech) Nand Kishor, D. Sc. (Tech)			
<p>In both normal operation and after faults power systems can suffer from inter-area oscillations, where generators of different areas oscillate against each other around their synchronous speed. These oscillations can be observed for example in generator power outputs and power transferred along lines. Oscillations may lower the transfer capacity and endanger the stability of the networks. Therefore effective damping of the oscillations is important for the operation of the power systems.</p> <p>The goal of this work was to study how the inter-area power oscillations could be damped using centralized control algorithms. Local controllers, where the feedback signal is measured for the controlled generator, have traditionally been used for damping the oscillations. The improvement of WAMS technology has enabled the use of simultaneous measurements performed at multiple locations in the network in control algorithms. In this work, the centralized controllers were designed using LQR (Linear Quadratic Regulator) algorithm, and they are used alongside local controllers to provide supplementary control signals to the generators.</p> <p>Centralized control algorithms were studied using two power system models. The first model was a two area four generator power system. The second model used was the model of 16 generator New England – New York power system. The performance of the centralized controllers were studied using the linear state space models of the systems and nonlinear time domain simulation. The robustness of the controllers were studied by changing the operating conditions of the power systems without changing the controller. In all cases the results were compared against the case where only local controllers were used.</p> <p>According to the linear analysis, the inter-area oscillations had higher damping ratios in the system when the centralized controllers were used. However, the nonlinear time domain simulations showed that the performance of the centralized controllers decreased after changes in system operating conditions and grid topology. This calls for future research on centralized control algorithms that can adapt to changes in the system.</p>			
Date: 27.11.2013		Language: Finnish	
		Number of pages: 8 + 72 + 21	
Keywords: Power Systems, LQR, WAMS, oscillations			

Alkusanat

Tämä työ on tehty opinnäytetyönä Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoulun Automaatio- ja systeemitekniikan laitokselle. Työ on osa pohjoismaista STRONGGrid-projektia ja siinä on ollut myös mukana Suomen kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj.

Haluaisin kiittää ensimmäisenä työni valvojaa Kai Zengeriä hänen kannustuksestaan, ohjeistuksestaan ja kommentteistaan tämän diplomityön aikana. Haluan kiittää myös ohjaajiani Janne Seppästä ja Nand Kishoria heidän opastuksestaan ja ohjeistuksestaan työn aikana. Lisäksi haluaisin kiittää professori Liisa Haarlaa hänen mielenkiinnostaan työtäni kohtaan ja kommentteistaan työn kirjoitusvaiheessa. Haluaisin kiittää vielä Antti-Juhani Nikkilää ja Jukka Turusta heidän työstään tässä projektissa.

Lopuksi haluaisin kiittää isääni ja äitiäni heidän kannustuksestaan opintojeni aikana.

Espoossa 27.11.2013

Otso Mäki

Symbolit ja lyhenteet

Symbolit

A	Tilaesityksen systeemimatriisi
B	Tilaesityksen sisääntulomatriisi, Suskeptanssi
C	Tilaesityksen ulostulomatriisi
D	Tilaesityksen suoravaikutusmatriisi
E	Jännite
E_B	Jäykän verkon jännite
E_R	Generaattorin jännite referenssijännitteen R-akselin suunnassa
E_I	Generaattorin jännite referenssijännitteen I-akselin suunnassa
E_{fd}	Roottorin d-akselin ohjausjännite
e_d	Staattorin d-akselin jännite
e_q	Staattorin q-akselin jännite
G	Konduktanssi
H	Generaattorin hitausvakio
i_d	Staattorin d-akselin suuntainen virtakomponentti
i_q	Staattorin q-akselin suuntainen virtakomponentti
i_0	Staattorin 0-akselin suuntainen virtakomponentti
i_{fd}	Roottorin d-akselin field-käämin läpi kulkeva virta
i_{1d}	Roottorin d-akselin vaimennuskäämin läpi kulkeva virta
i_{1q}	Roottorin q-akselin vaimennuskäämin 1 läpi kulkeva virta
i_{2q}	Roottorin q-akselin vaimennuskäämin 2 läpi kulkeva virta
K	LQR-säätimen tilatakaisinkytkentä
L	Kalman-suotimen estimaattimatriisi, Induktanssi
L_{ffd}	Itseinduktanssi roottorin d-akselin field-käämille
L_{11d}	Itseinduktanssi roottorin d-akselin vaimennuskäämille 1
L_{f1d}	Keskinäisinduktanssi roottori d-akselin käämeille
L_{11q}	Itseinduktanssi roottorin q-akselin vaimennuskäämille 1
L_{22q}	Itseinduktanssi roottorin q-akselin vaimennuskäämille 2
L_{aq}	Keskinäisinduktanssi roottori q-akselin käämeille
L_{fd}	Roottorin d-akselin field-käämin kokonaisinduktanssi
L_{1d}	Roottorin d-akselin vaimennuskäämin kokonaisinduktanssi
L_{1q}	Roottorin q-akselin vaimennuskäämin 1 kokonaisinduktanssi
L_{2q}	Roottorin q-akselin vaimennuskäämin 2 kokonaisinduktanssi
O	Tarkkailtavuusmatriisi
P	Pätöteho
P_m	Mekaaninen teho
Q	Loisteho, LQR-säätimen viritysmatriisi
p	Participation Factor, osallistumiskerroin
R	Resistanssi, LQR-säätimen viritysmatriisi
R_a	Staattorin resistanssi
R_E	Resistanssi generaattorin ja jäykän verkon välillä
R_{fd}	Roottorin d-akselin field-käämin resistanssi
R_{1d}	Roottorin d-akselin vaimennuskäämin resistanssi
R_{1q}	Roottorin q-akselin vaimennuskäämin 1 resistanssi
R_{2q}	Roottorin q-akselin vaimennuskäämin 2 resistanssi
S	Ohjattavuusmatriisi
T_e	Sähköinen vääntömomentti
T_m	Mekaaninen vääntömomentti

V	Jännite, Kalman-suotimen viritysmatriisi
W	Kalman-suotimen viritysmatriisi
X	Reaktanssi
Z	Impedanssi
Y	Admittanssi
δ	Roottorikulma
λ	Ominaisarvo
ζ	Vaimennussuhde
φ	Vasen ominaisvektori
Ψ	Oikea ominaisvektori
Ψ_d	Staattorin d-akselin käämivuo
Ψ_q	Staattorin q-akselin käämivuo
Ψ_{fd}	Roottorin d-akselin ohjauskäämin käämivuo
Ψ_{1d}	Roottorin d-akselin vaimennuskäämin käämivuo
Ψ_{1q}	Roottorin q-akselin vaimennuskäämin 1 käämivuo
Ψ_{2q}	Roottorin q-akselin vaimennuskäämin 2 käämivuo
Ψ_{ad}	Roottorin d-akselin vaimentava käämivuo
Ψ_{aq}	Roottorin q-akselin vaimentava käämivuo
ω_r	Generaattorin kulmanopeuden poikkeama perusarvosta
ω_0	Generaattorin kulmanopeuden perusarvo

Lyhenteet

AVR	Automatic Voltage Regulator, automaattinen jännitteensäätäjä
LQG	Linear Quadratic Gaussian, stokastinen lineaarikvadraattinen säädin
LQR	Linear Quadratic Regulator, lineaarikvadraattinen säädin
PF	Participation Factor, osallistumiskerroin
PMU	Phasor Measurement Unit, osoitinsuureen mittausyksikkö
PSS	Power System Stabilizer, generaattorin magnetoinnin lisästabilointipiiri
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor, tyristoriohjattu sarjakondensaattoriparisto
WACS	Wide-Area Control System, laajan alueen säätöjärjestelmä
WAMS	Wide-Area Measurement System, laajan alueen valvontajärjestelmä

Sisällysluettelo

Alkusanat.....	iv
Symbolit ja lyhenteet.....	v
Symbolit	v
Lyhenteet	vi
1 Johdanto.....	1
1.1 Diplomityön tausta	1
1.2 Sähkönsiirtojärjestelmien stabiilisuus	2
1.2.1 Kulmastabiilisuus ja tehoheilahtelut.....	2
1.2.2 Heilahtelujen luokittelu	2
1.3 Tavoite ja tutkimusongelmien rajaus.....	3
1.4 Kirjallisuuskatsaus.....	4
1.5 Rakenne	5
2 Tilaesitys.....	6
2.1 Epälineaarinen tilaesitys	6
2.2 Lineaarinen tilaesitys	6
2.3 Ominaisarvot	7
2.4 Ominaisvektorit	8
2.5 Ohjattavuus ja tarkkailtavuus	9
2.6 Osallistumiskerroin.....	9
2.7 Moodien ohjattavuus	10
3 Sähkönsiirtojärjestelmien mallintaminen	11
3.1 Generaattorin mallintaminen	11
3.1.1 Generaattorin yhtälöt	11
3.1.2 Generaattorin tilaesitys	14
3.1.3 Staattoriyhtälöt ja ulostulot.....	17
3.2 Ohjausjärjestelmät	18
3.2.1 Magnetointijärjestelmä	18
3.2.2 Magnetointijärjestelmän lisästabiloointipiiri	19
3.2.3 Turbiinit ja nopeussäätäjä.....	21
3.3 Verkon mallintaminen	22
3.3.1 Johdot	22
3.3.2 Kuormat	23
3.3.3 Siirtoverkon yhtälöt.....	23
3.3.4 Verkon tehonjako ja tasapainotilan ratkaiseminen	24
3.4 Generaattori- ja verkkoyhtälöiden yhdistäminen.....	25

3.5	Tutkittavat sähkönsiirtojärjestelmien mallit	27
3.5.1	Neljän generaattorin sähkönsiirtojärjestelmän malli	27
3.5.2	Uuden-Englannin ja New Yorkin sähkönsiirtojärjestelmän malli	29
3.5.3	Lineaarinen mallintaminen	30
4	Laajan alueen mittausjärjestelmä.....	31
4.1	Järjestelmän rakenne.....	31
4.2	Sovelluksia	32
4.3	Säätörakenteet.....	32
4.4	Viiveet	34
5	Keskitetyt säätöalgoritmit.....	35
5.1	LQR-säädin.....	35
5.2	Tilaestimointi.....	36
6	Tulokset	38
6.1	Ohjattavien generaattoreiden ja mittaussignaalien valitseminen.....	38
6.2	Neljän generaattorin järjestelmä	41
6.2.1	Säätämättömän ja PSS-säädetyt järjestelmän lineaarinen analyysi	41
6.2.2	LQR-säädetyt järjestelmän lineaarinen analyysi	42
6.2.3	Epälineaariset simuloinnit	44
6.2.4	Ohjaussignaalit	51
6.3	Uuden-Englannin ja New Yorkin sähkönsiirtojärjestelmä	54
6.3.1	Säätämättömän ja PSS-säädetyt järjestelmän lineaarinen analyysi	54
6.3.2	LQR-säädetyt järjestelmän lineaarinen analyysi	55
6.3.3	Epälineaariset simuloinnit	58
7	Yhteenveto.....	66
7.1	Tulokset ja johtopäätökset	66
7.2	Tutkimusaiheet tulevaisuudessa	67
	Viitteet	69
	Liiteluettelo.....	73
	Liite A: Neljän generaattorin sähkönsiirtojärjestelmän mallin parametrit	74
	Liite B: Uuden-Englannin ja New Yorkin sähkönsiirtojärjestelmän mallin parametrit	77
	Liite C: Parametrien muunnokset	83
	Liite D: Neljän generaattorin järjestelmän mallin simuloinnit	84
	Liite E: Uuden-Englannin ja New Yorkin sähkönsiirtojärjestelmän mallin simuloinnit.....	87

1 Johdanto

Tämän luvun tavoitteena on antaa kuva diplomityön tarkoituksesta, taustasta ja rakenteesta. Ensimmäisenä kuvataan työn motivaatio ja tausta. Tämän jälkeen esitellään työhön liittyvät keskeisimmät tutkimusongelmat ja –tavoitteet. Viimeiseksi käydään läpi työn rakenne.

1.1 Diplomityön tausta

Sähkön siirtojärjestelmän tehtävänä on siirtää voimalaitoksissa tuotettua sähköä sähköasemille, joista se siirretään edelleen kuluttajille. Sähköenergiaa ei voida varastoida suurissa määrin, joten tuotannon ja kulutuksen on vastattava toisiaan kaikilla ajanhetkillä. Tuotannon tasausta varten alueita liitetään toisiinsa siirtoverkkojen välityksellä, jolloin kaikkien alueiden generaattoreiden on toimittava samalla taajuudella. (Elovaara & Haarla 2011)

Kaikkien teknisten järjestelmien tapaan sähkönsiirtojärjestelmät vikaantuvat. Lisäksi verkon toimintatilassa tapahtuu usein muutoksia, kun kuormien tehonkulutus muuttuu ja järjestelmän toimintapiste muuttuu. Näiden vikojen ja muutosten seurauksena järjestelmissä voi esiintyä matalataajuuksisia sähkömekaanisia heilahteluja, joissa generaattorit heilahtelevat tahtinopeuksiensa ympärillä toisiaan vasten, mikä aiheuttaa värähtelyjä sekä verkossa siirtyvissä tehoissa että sen jännitetasoissa. Heilahtelut pienentävät verkon siirtokykyä mutta ovat hyväksyttävissä, mikäli ne vaimenevat riittävän nopeasti. Heilahtelut, jotka eivät vaimene, ovat järjestelmän toiminnan kannalta vaarallisia ja voivat lopulta johtaa suurhäiriöön. Esimerkiksi elokuussa 1996 tapahtuneen läntisten Yhdysvaltojen ja Kanadan sähköverkon suurhäiriö oli seurausta amplitudiltaan kasvavista matalataajuuksisista heilahteluista (Rogers, 2000).

Sähkön siirtojärjestelmä tarvitsee toimiakseen säätöjärjestelmiä, joiden tehtävänä on vaimentaa järjestelmissä tapahtuvia heilahteluja ja säilyttää tehontuotanto ja jännitetasot hyväksyttävien rajojen sisällä sekä normaalin toiminnan aikana että erilaisten vikojen ja muutosten jälkeen. Perinteisesti generaattoreiden säädössä on käytetty hajautettuja säätömenetelmiä, joissa takaisinkytkennässä käytettävä mittaussignaali otetaan säädettävästä generaattorista. Tavallisimmin generaattoreiden säädössä käytetään lisästabilointipiirejä (Power System Stabilizer, PSS), joiden toimintaa kuvataan tarkemmin kohdassa 3.2.2.

Laaja-alaisten mittausjärjestelmien (Wide Area Measurement System, WAMS) kehitys on mahdollistunut uudenlaisen tavan tarkkailla ja säätää sähkönsiirtojärjestelmiä. WAMS-järjestelmät hyödyntävät GPS-synkronoituja hetkellisarvoja mittaavia PMU-mittalaitteita (Phasor Measurement Unit), jotka lähettävät mittausdatan datakeskukseen. Ne mahdollistavat verkon eri kohdissa tehtyjen mittausten hyödyntämisen valvonnassa ja keskitetyissä generaattoreiden säätöalgoritmeissa, joilla on mahdollista kasvattaa alueiden välisten heilahtelujen vaimennusta (Kamwa et al., 2001). Järjestelmien säädössä ongelmallisia ovat kuitenkin paikallisten ja alueiden välisten heilahtelujen väliset vuorovaikutukset. Paikallisten heilahtelujen vaimentaminen saattaa tehdä alueiden

välisistä heilahteluista epästabiileja. Toisaalta alueiden välisten heilahtelujen vaimentaminen saattaa vaikuttaa vastaavalla tavalla paikallisiin heilahteluihin. (Pal et al., 2005)

1.2 Sähkönsiirtojärjestelmien stabiilisuus

Sähkönsiirtojärjestelmän stabiilisuus voidaan määritellä järjestelmän kykynä säilyttää tasapainotila normaaleissa toimintaolosuhteissa tai saavuttaa uusi hyväksyttävä tasapainotila, kun järjestelmään on kohdistunut häiriö (Kundur et al., 2004). Sähkönsiirtojärjestelmien stabiilisuusongelmat voidaan jakaa kolmeen luokkaan. Ensimmäinen stabiilisuusongelma on kulumastabiilisuus eli generaattoreiden pysyminen tahdissa keskenään. Toinen keskeinen stabiilisuusongelma sähkönsiirtojärjestelmissä on jännitestabiilisuus, jossa tarkastellaan verkon kykyä säilyttää hyväksyttävät jännitetasot kaikissa verkon solmuissa sekä normaaleissa toimintaolosuhteissa että häiriöiden jälkeen (Elovaara & Haarla, 2011). Viimeinen luokka on taajuusstabiilisuus, jolla tarkoitetaan sähkönsiirtojärjestelmän kykyä säilyttää järjestelmän taajuus lähellä sen nimellisarvoa. Tässä työssä sähkönsiirtojärjestelmiä tarkastellaan kulumastabiilisuuden kannalta.

1.2.1 Kulmastabiilisuus ja tehoheilahtelut

Kulumastabiilisuudella tarkoitetaan keskenään liitettyjen tahtigeneraattoreiden kykyä pysyä tahdissa. Kun useampia tahtikoneita on kytketty yhteen siirtoverkon välityksellä, kaikkien generaattoreiden roottoreiden mekaanisten pyörimisnopeuksien oltava synkronisia toistensa kanssa. Generaattorin kuormituksen muuttuessa sen roottorin kulmanopeus pyrkii muuttumaan mikäli generaattoria pyörittävä mekaaninen vääntömomentti säilyy samana. Kuormituksen kasvaessa generaattorin kulmanopeus alkaa hidastua ja vastaavasti kuormituksen vähentyessä kulmanopeus alkaa kiihtyä. Mikäli generaattori pystyy vian jälkeen palaamaan tahtikäyntiin, se on kulumastabiili. Jos generaattori ei pysty palaamaan tahtikäyntiin ja sen taajuus poikkeaa suuresti verkon nimellistaajuudesta, generaattori on irrotettava verkosta. (Elovaara & Haarla, 2011)

Erilaisten vikatilanteiden seurauksena verkkoon voi syntyä generaattoreiden nopeuksien heilahtelusta johtuvia matalataajuuksisia sähkömekaanisia värähtelyjä. Nämä värähtelyt näkyvät esimerkiksi generaattoreiden tuottamissa tehoissa sekä siirtoverkossa solmupisteiden jännitteiden ja johdoilla siirtyvien tehojen ja virtojen heilahteluna. Heilahtelujen vaimeneminen riippuu sekä järjestelmän rakenteesta että sen toimintatilasta. Toimintatila määräytyy järjestelmän tuotannon, kuormituksen ja johdoilla tapahtuvien siirtojen perusteella.

1.2.2 Heilahtelujen luokittelu

Sähkönsiirtojärjestelmässä tapahtuvat heilahtelut voidaan jakaa erilaisiin luokkiin riippuen mistä ne aiheutuvat ja mihin järjestelmän osiin ne vaikuttavat. Erilaisia heilahtelujen luokkia ovat muun muassa:

- paikalliset heilahtelut,
- ohjauksista aiheutuvat heilahtelut ja
- alueiden väliset heilahtelut.

Paikallisessa heilahtelussa yksittäisen generaattori heilahtelee muuta järjestelmää vasten. Nämä heilahtelut tapahtuvat yleensä taajuusalueella 1–2 Hz. Paikallisen heilahtelun vaikutus on havaittavissa parhaiten generaattorissa itsessään ja mahdollisesti johdoilla, jotka yhdistävät sen muuhun verkkoon. Ohjauksista aiheutuvat heilahtelut ovat seurausta huonosti viritetyistä generaattoreiden magnetointijärjestelmistä tai muista säätöjärjestelmistä. Nämä kaksi heilahtelutyyppiä eivät ole tämän työn kannalta keskeisiä, vaan tässä työssä tarkastellaan erityisesti alueiden välisiä heilahteluja ja niiden vaimentamista keskitetyillä säätöalgoritmeilla. (Pal et al., 2005)

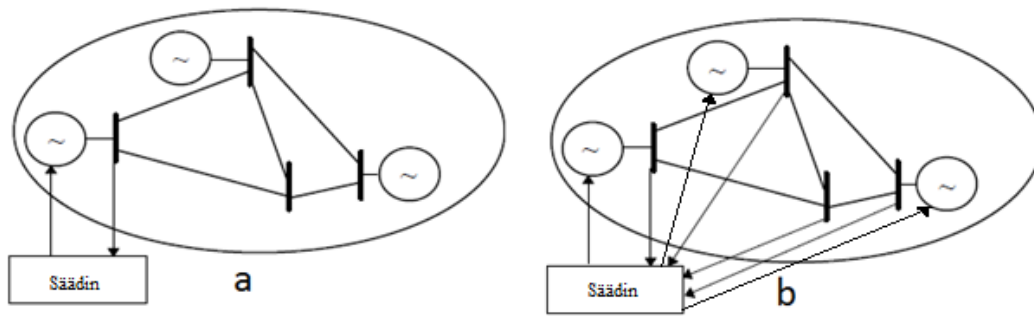
Alueiden väliset heilahtelut ovat havaittavissa suuressa osassa koko sähköjärjestelmää. Heilahtelussa kaksi koherenttia generaattoriryhmää heilahtelee toisiaan vasten paikallisia heilahteluja matalammalla taajuudella (Pal et al., 2005). Heilahtelun seurauksena alueita yhdistävissä johdoissa siirtyvien tehojen heilahtelu voi olla hyvin suurta, mikä pienentää verkon siirtokapasiteettia. Alueiden väliset heilahtelut tapahtuvat yleensä alle 1 Hz:n taajuudella. Esimerkiksi Pohjoismaiden yhdistetyssä sähkönsiirtojärjestelmässä Etelä-Suomen ja Etelä-Ruotsin generaattorit heilahtelevat toisiaan vasten noin 0,3 Hz:n taajuudella (Uhlen et al., 2003).

1.3 Tavoite ja tutkimusongelmien raja

Tämän diplomityön tavoitteena on tutkia ja vertailla kahden sähkönsiirtojärjestelmän alueiden välisten tehoheilahtelujen vaimentamista hajautetuilla ja keskitetyillä säätöalgoritmeilla. Ensimmäisenä tarkastellaan neljän generaattorin järjestelmän mallia (Rogers, 2000). Toisena tarkastellaan Uuden-Englannin ja New Yorkin yhdistetyn sähkönsiirtojärjestelmän 16 generaattorin mallia, joka on kuvattu muun muassa samassa (Rogers, 2000) kirjassa sekä (Pal et al., 2005) teoksessa.

Työn tavoitteena on selvittää, kuinka siirtojärjestelmissä alueiden välisiä heilahteluja voidaan vaimentaa käyttäen WAMS-järjestelmää hyödyntävää keskitettyä LQR-säädintä, joka tuottaa yhdelle tai useammalle verkon generaattorille paikallista PSS-säädintä tukevan ohjaussignaalin. Erityisenä painopisteenä on WAMS-pohjaisten keskitettyjen säätöalgoritmien tehokkuuden vertaaminen pelkkiä PSS-säätimiä käyttävään säätörakenteeseen. Nämä kaksi erilaista säätörakennetta on esitetty kuvassa 1.1. Lisäksi tarkastellaan LQR-säätimellä ohjattavien generaattoreiden valinnan ja säätimen suunnittelussa käytettyjen parametrien vaikutusta säätimen tehokkuuteen.

Käytettyjä säätöalgoritmeja vertaillaan tarkastelemalla paikallisesti ja keskitetysti säädettyjen järjestelmien lineaarisia tilaesityksiä. Tilaesityksistä voidaan ratkaista alueiden välisiä moodeja kuvaavat ominaisarvot. Ominaisarvojen perusteella moodeille lasketaan vaimennussuhteet, joiden perusteella arvioidaan säädinten tehokkuutta. Alueiden välisten moodien vaimentamisen lisäksi on myös tärkeää, että muut verkossa tapahtuvat heilahtelut eivät muutu epästabiileiksi keskitetyn säätimen vaikutuksesta. Lisäksi säätöalgoritmien tehokkuutta ja robustisuutta tarkastellaan epälineaaristen aikatazon simulaatioiden avulla mallintamalla verkossa tapahtuvia vikoja ja tarkastelemalla järjestelmien vasteita. Simulaatioiden avulla tarkastellaan myös säätimen robustisuutta järjestelmän toimintapisteen muutoksille.



Kuva 1.1. a: Yhtä generaattoria ohjaava paikallinen säädin. b: Kaikkia generaattoreita ohjaava keskitetty säädin.

1.4 Kirjallisuuskatsaus

Tässä kohdassa luodaan lyhyt katsaus tämän työn aiheeseen liittyvään aiempaan tutkimukseen. Sähkönsiirtojärjestelmissä LQR-säädintä on käytetty tavallisesti hierarkkisessa säätörakenteessa, jossa se tukee paikallisia PSS-säätimiä ja pyrkii kasvattamaan usein huonosti vaimennettujen alueiden välisten moodien vaimennusta (Aldeen et al., 1995), (Sanchez-Gasca et al., 1989). Säätörakenne on robusti vioille, koska paikalliset PSS-säätimet pyrkivät säilyttämään järjestelmän stabiileina vaikka LQR-säätimen ohjaussignaali menetettäisiin. LQR-säätimen vaatima tilaestimaattori on muodostettu yleisimmin Kalman-suotimena, jossa mittaussigaleina käytetään verkon jännitteiden kulmia (Dalela et al., 2005), (Almutairi et al., 2009). LQR-säätöalgoritmi on havaittu toimivaksi myös tapauksissa, joissa mittaus- ja ohjaussigaleissa on viivettä (Dotta et al., 2009).

WAMS-järjestelmän tuottamia mittauksia on hyödynnetty myös muihin säätöalgoritmeihin perustuvien keskitettyjen säädinten yhteydessä. Paikallisten PSS-säätimien mukaisia lead-lag-kompensaattoreita on viritetty käyttämään paikallisten mittausten lisäksi WAMS-järjestelmän tuottamia globaaleja mittauksia (Aboul-Ela et al., 1996). Säätimien suunnitteluun on käytetty myös H_2 - ja H_∞ -säätöalgoritmeja, jolloin säädetyin järjestelmän on havaittu olevan hyvin robusti toimintatilan muutoksille ja mallinnusvirheille (Klein et al., 1995), (Hashmani et al., 2010). H_∞ -säätöalgoritmin tapauksessa on painofunktioiden määrittämisen havaittu olevan vaikeaa (Zolotas et al., 2007).

Keskitetyissä säätösovelluksissa keskeisenä tekijänä on säädinten sijoittaminen, koska todellisissa järjestelmissä halutaan optimoida suorituskyky ja rajoittaa kustannuksia. Säädinten sijoittamisen ja viritämisen apuna on käytetty järjestelmän moodin ohjattavuutta, jolloin on havaittu, että tällä tavoin voidaan redusoida käytettävien ohjausten määrää ilman että säätimen suorituskyky heikkenee (Almutairi et al., 2009), (Dotta et al., 2009). WAMS-mittausdataa hyödyntäviä säätimiä on tutkittu ohjaamalla muun muassa generaattoreita (Hashmani et al., 2010), loistehokompensaattoreita (Johansson et al., 2009) ja TCSC-laitteita (Thyristor Controlled Series Capacitor), (Zolotas et al., 2007).

1.5 Rakenne

Luvussa 2 esitellään sähkönsiirtojärjestelmien mallintamisessa ja analysoinnissa käytettäviä keskeisimpiä käsitteitä. Ensimmäisenä kuvataan mallintamiseen liittyvät epälineaarinen ja lineaarinen tilaesitys. Tämän jälkeen esitellään järjestelmien analyysiin liittyviä käsitteitä kuten ominaisarvot ja -vektorit.

Luvussa 3 kuvataan sähkönsiirtojärjestelmien mallintamista sekä yksittäisten komponenttien että koko järjestelmän tasolla. Ensimmäiseksi luvussa esitetään työssä käytettävän yksittäisen generaattorimallin tilaesityksen yhtälöiden muodostaminen. Toiseksi kuvataan generaattorin ohjausjärjestelmien mallintaminen. Kuvatut ohjausjärjestelmät ovat automaattinen jännitteensäätäjä, turbiinin nopeussäätäjän ja jännitteensäätäjän lisästabilointipiiri. Seuraavaksi kuvataan stabiilisuustarkastelussa generaattoreita yhdistävän siirtoverkon mallintaminen. Tämän jälkeen kuvataan kaikkien verkon komponenttien yhdistäminen koko verkkoa kuvaavaksi malliksi. Viimeisenä luvussa esitellään työssä tarkasteltavat kaksi sähkönsiirtojärjestelmää.

Luvussa 4 kuvataan WAMS-järjestelmän toiminta. Ensimmäisenä luvussa kuvataan WAMS-järjestelmän komponentit ja kokonaisen järjestelmän rakenne. Tämän jälkeen esitellään lyhyesti järjestelmän erilaisia sovelluksia ja käytettävä WAMS-pohjainen säätörakenne.

Luvussa 5 kuvataan LQR-säädin, jota käytetään keskitettyjen säädinten muodostamisessa. Aluksi käydään läpi LQR-säätimen teoria ja kuvataan sen muodostaminen. Tämän jälkeen kuvataan LQR-säätimen tarvitseman tilaestimaattorin muodostaminen Kalman-suotimena.

Luvussa 6 esitellään lineaaristen mallien analyysin ja epälineaaristen aikatazon simulointien avulla saavutetut tulokset. Keskitetyllä LQR-säätimellä ohjattavien generaattoreiden valitseminen tässä työssä tarkasteltavien sähkönsiirtojärjestelmien tapauksessa. Tämän jälkeen keskitettyjen säädinten toimintaa tarkastellaan ensin neljän generaattorin sähkönsiirtojärjestelmän mallin avulla. Keskitettyjen säädinten tehokkuutta alueiden välisen moodin vaimennuksessa tarkastellaan ensin säädetyin järjestelmän ominaisarvojen avulla käyttämällä järjestelmän linearisoitua tilaesitysmallia. Tämän jälkeen tarkastellaan järjestelmän käyttäytymistä vikojen jälkeen epälineaaristen aikatazon simulaatioiden avulla sekä käyttämällä LQR-säädintä että tapauksessa, jossa järjestelmää ohjataan ainoastaan paikallisilla PSS-säätimillä. Lopuksi vastaavat tarkastelut tehdään 16 generaattorin Uuden-Englannin ja New Yorkin sähkönsiirtojärjestelmän mallille.

Luvussa 7 esitetään yhteenveto työn vaiheista ja tarkastellaan työssä saavutettujen tulosten merkitystä. Tämän jälkeen esitellään muutamia tulevaisuudessa tarkasteltavia aiheeseen liittyviä tutkimusongelmia.

2 Tilaesitys

Tehoheilahtelujen analysointia varten sähkönsiirtojärjestelmä esitetään usein ryhmänä differentiaaliyhtälöitä, jotka linearisoidaan järjestelmän toimintapisteen ympäristössä. Linearisoitu tilaesitys kuvaa järjestelmän käyttäytymistä tämän toimintapisteen ympäristössä, ja sen avulla voidaan tutkia siinä tapahtuvia tehoheilahteluja. Tässä luvussa kuvataan ensin epälineaarinen sekä lineaarinen tilaesitysmalli. Tämän jälkeen kuvataan lineaaristen tilaesitysten analysointiin käytettäviä käsitteitä. Käytettävät määritelmät ja notaatiot on kuvattu muun muassa (Kundur, 1994) ja (Golnaraghi et al., 2009) teoksissa. Käytettävä notaatio perustuu (Kundur, 1994) esitykseen aiheesta.

2.1 Epälineaarinen tilaesitys

Dynaamisia järjestelmiä mallinnettaessa käytetään usein n yhtälöstä muodostuvaa ryhmää ensimmäiseen asteen epälineaarisia differentiaaliyhtälöitä, jotka voidaan esittää seuraavassa muodossa.

$$\dot{x}_i = f_i(x_1, \dots, x_n; u_1, \dots, u_r) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.1)$$

Yhtälöt voidaan esittää vektorimuodossa seuraavasti.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}), \quad (2.2)$$

missä \mathbf{x} , \mathbf{u} ja \mathbf{f} ovat pystyvektoreita muodossa

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_r \end{bmatrix} \quad \mathbf{f} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

Sähkönsiirtojärjestelmissä tilavektori \mathbf{x} sisältää järjestelmän generaattoreita ja niiden ohjausjärjestelmiä kuvaavat tilamuuttujat, \mathbf{u} sisältää järjestelmän ohjaussignaalit ja $\dot{\mathbf{x}}$ kuvaa tilamuuttujien derivaatat ajan suhteen. Tasapainotilassa kaikkien tilamuuttujien derivaatat $\dot{\mathbf{x}}$ ovat samanaikaisesti nollia. Järjestelmän ulostulomuuttujat voidaan esittää tilamuuttujien ja syötteiden funktiona seuraavasti:

$$\mathbf{y} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}). \quad (2.4)$$

2.2 Lineaarinen tilaesitys

Linearisoitu tilaesitys toimintapisteen $(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ympärillä kuvataan seuraavasti:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B} \Delta \mathbf{u} \quad (2.5)$$

$$\Delta \mathbf{y} = \mathbf{C} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{D} \Delta \mathbf{u} \quad (2.6)$$

Yhtälöissä vektori $\Delta \mathbf{x}$ kuvaa järjestelmän tilamuuttujien muutoksia, $\Delta \mathbf{y}$ ulostulosignaalien muutoksia ja $\Delta \mathbf{u}$ syötesignaalien muutoksia niiden tasapainopisteistä, eli ne on määritelty seuraavasti

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_0, \quad \Delta \mathbf{y} = \mathbf{y} - \mathbf{y}_0, \quad \Delta \mathbf{u} = \mathbf{u} - \mathbf{u}_0 \quad (2.7)$$

Oletetaan, että järjestelmällä on n tilamuuttujaa, r syötesignaalia ja m ulostuloa. Tällöin \mathbf{A} on $n \times n$ systeemimatriisi, \mathbf{B} on $n \times r$ ohjausmatriisi, \mathbf{C} $m \times n$ lähtömatriisi ja \mathbf{D} $m \times r$ suoravaikutusmatriisi. Matriisit on määritelty seuraavien funktioiden f ja g osittaisderivaattojen arvoina järjestelmän toimintapisteessä $(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{df_1}{dx_1} & \dots & \frac{df_1}{dx_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{df_n}{dx_1} & \dots & \frac{df_n}{dx_n} \end{bmatrix}_{x=x_0} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{df_1}{du_1} & \dots & \frac{df_1}{du_r} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{df_n}{du_1} & \dots & \frac{df_n}{du_r} \end{bmatrix}_{u=u_0} \quad (2.8)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \frac{dg_1}{dx_1} & \dots & \frac{dg_1}{dx_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{dg_m}{dx_1} & \dots & \frac{dg_m}{dx_n} \end{bmatrix}_{x=x_0} \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \frac{dg_1}{du_1} & \dots & \frac{dg_1}{du_r} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{dg_m}{du_1} & \dots & \frac{dg_m}{du_r} \end{bmatrix}_{u=u_0} \quad (2.9)$$

2.3 Ominaisarvot

Kun sähkönsiirtojärjestelmä on kuvattu yhtälöiden (2.5) ja (2.6) mukaisesti lineaarisena tilaesityksenä, sen käyttäytymistä voidaan analysoida systeemimatriisin \mathbf{A} ominaisarvojen avulla. Ominaisarvot λ matriisille \mathbf{A} saadaan ratkaisemalla yhtälö

$$\det(\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I}) = 0 \quad (2.10)$$

Ominaisarvot voivat olla reaalisia tai kompleksisia. Mikäli \mathbf{A} on reaalinen, kompleksiset ominaisarvot esiintyvät aina konjugaattipareina muodossa

$$\lambda = \sigma \pm j\omega \quad (2.11)$$

Järjestelmän stabiilisuutta toimintapisteessä voidaan tutkia tarkastelemalla sen ominaisarvoja. Toimintapiste on stabiili, mikäli kaikki ominaisarvot sijaitsevat kompleksitason vasemmassa puolitasossa, eli niiden reaali-osat ovat negatiivisia. Mikäli ominaisarvo sijaitsee kompleksitason oikeassa puolitasossa, järjestelmän sitä vastaava aikatason käyttäytyminen eli moodi on epästabiili. Koko järjestelmä on epästabiili mikäli yksikin ominaisarvo sijaitsee oikeassa puolitasossa. Tämä voidaan nähdä tarkastelemalla ominaisarvoa λ_i vastaavaa moodia, joka on muodossa $e^{\lambda_i t}$. Tästä nähdään, että ominaisarvon reaalisen osan ollessa positiivinen, värähtelyn amplitudi kasvaa ajan mukana ja järjestelmä on epästabiili.

Ominaisarvosta (2.11) voidaan määritellä sitä vastaavan värähtelyn taajuus f sekä vaimennussuhde ζ (Kundur, 1994).

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.12)$$

$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (2.13)$$

Ainoastaan kompleksiset ominaisarvot kuvaavat värähtelyjä. Yhtälöstä (2.13) nähdään, että ominaisarvon reaaliosan itseisarvon ollessa suuri suhteessa imaginaariosaan, värähtelyn vaimennussuhde on lähellä arvoa 1 eli se vaimenee nopeasti. Epästabiileja ja huonosti vaimennettuja värähtelyjä vastaavilla ominaisarvoilla vaimennussuhde on negatiivinen tai lähellä arvoa 0.

2.4 Ominaisvektorit

Matriisin A ominaisarvolle λ_i n -pituisen pystyvektori Φ_i , joka toteuttaa yhtälön

$$A\Phi_i = \lambda_i\Phi_i \quad (2.14)$$

on ominaisarvoa λ_i vastaava matriisin A oikea ominaisvektori. Vastaavasti n -pituisen vaakavektori Ψ_i , joka toteuttaa yhtälön

$$\Psi_i A = \lambda_i \Psi_i \quad (2.15)$$

on matriisin A vasen ominaisvektori ominaisarvolle λ_i . Mikäli ominaisvektorit ovat normalisoituja, niille pätee

$$\Psi_i \Phi_i = 1. \quad (2.16)$$

Eri ominaisarvoja vastaavat ominaisvektorit ovat vastaavasti ortogonaalisia eli niille on voimassa yhtälö

$$\Psi_i \Phi_j = 0, i \neq j. \quad (2.17)$$

Määritellään seuraavat matriisit ominaisvektoreiden avulla.

$$\Phi = [\Phi_1 \dots \Phi_n] \quad (2.18)$$

$$\Psi = [\Psi_1^T \dots \Psi_n^T]^T \quad (2.19)$$

Näille matriiseille pätee

$$\Psi = \Phi^{-1}. \quad (2.20)$$

Lineaarinen tilaesitys voidaan esittää myös modaalisessa muodossa, jossa uudet tilamuuttujat ovat toisistaan riippumattomia ja kuvaavat järjestelmän moodeja. Tekemällä tilavektorille muunnos

$$\Delta x = \Phi z, \quad (2.21)$$

saadaan yhtälöt (2.5) ja (2.6) muotoon

$$\Phi \dot{z} = A\Phi z + B\Delta u \quad (2.22)$$

$$y = C\Phi z + D\Delta u. \quad (2.23)$$

Tästä saadaan ratkaistua uusi tilaesitys, jonka tilavektori on z .

$$\dot{z} = \Phi^{-1}A\Phi z + \Phi^{-1}B\Delta u = \Psi A\Phi z + \Psi B\Delta u = \Lambda z + \Psi B\Delta u \quad (2.24)$$

$$y = C\Phi z + D\Delta u \quad (2.25)$$

Tämän tilaesityksen diagonaalisen systeemimatriisin Λ alkiot ovat alkuperäisen tilaesityksen systeemimatriisin ominaisarvot.

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \lambda_n \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

2.5 Ohjattavuus ja tarkkailtavuus

Järjestelmän sanotaan olevan ohjattava, mikäli on mahdollista löytää ohjaussekvenssi, jolla järjestelmä voidaan saattaa mielivaltaisesta alkutilasta origoon äärellisessä ajassa. Ohjattavuutta voidaan tutkia ohjattavuusmatriisin S avulla.

$$S = [B \quad AB \quad \dots \quad A^{n-1}B] \quad (2.27)$$

Järjestelmä on ohjattava, mikäli ohjattavuusmatriisin aste on täysi, eli sen kaikki rivit ovat lineaarisesti riippumattomia. Mikäli järjestelmä ei ole ohjattava, se voi olla kuitenkin stabiilitava. Stabiilitavuuden ehtona on, että on olemassa matriisi K siten että matriisi $A-BK$ on stabiili.

Järjestelmän sanotaan olevan tarkkailtava, jos mille tahansa ohjaussekvenssille järjestelmän tilamuuttujien arvot voidaan määrittää ulostulomuuttujien mittausten avulla. Tämä tarkoittaa, että ulostuloista voidaan määrittää koko järjestelmän tila. Mikäli järjestelmä ei ole tarkkailtava, joidenkin sen tilamuuttujien arvoja ei voida määrittää tehtyjen mittausten perusteella. Järjestelmän tarkkailtavuus voidaan määrittää tarkkailtavuusmatriisista. Yhtälöiden (2.5) ja (2.6) mukaiselle lineaariselle tilaesitykselle tarkkailtavuusmatriisi O on

$$O = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}. \quad (2.28)$$

Mikäli matriisin (2.28) aste on täysi, se on tarkkailtava. Tarkkailtavuutta heikompi ehto on havaittavuus. Havaittavuuden ehtona on, että järjestelmän ei-tarkkailtavat tilat ovat stabiileja eli on olemassa matriisi L siten että matriisi $A-LC$ on stabiili.

2.6 Osallistumiskerroin

Osallistumiskerroin (participation factor) kuvaa järjestelmän ominaisarvojen herkkyyttä suhteessa muutoksiin systeemimatriisin A diagonaalielementeissä. Ne kertovat kuinka vahvasti yksittäisen tilamuuttujan käyttäytyminen näkyy tietyssä järjestelmän moodissa (Pal et al., 2005). Tilan r vaikutusta moodiin i kuvaava osallistumiskerroin p_{ir}

määritellään moodia vastaavien vasemman ja oikean ominaisvektorin elementtien r tulona.

$$p_{ir} = \frac{d\lambda_i}{da_{rr}} = \psi_{ir}\phi_{ir} \quad (2.29)$$

Kaikkien eri tilamuuttujien vaikutusta kuvaava osallistumiskerroinvektori moodille i määritellään vektorina

$$\mathbf{p}_i = [p_{i1} \quad \dots \quad p_{in}]^T. \quad (2.30)$$

Vastaavasti kaikkien moodien ja tilamuuttujien vaikutuksia kuvaa seuraavaa matriisi.

$$\mathbf{P} = [\mathbf{p}_1 \quad \dots \quad \mathbf{p}_n] \quad (2.31)$$

osallistumiskerrointen avulla voidaan tutkia kuinka tilan r vaimentaminen vaikuttaa tietyn moodin vaimentamiseen. Mikäli arvo on positiivinen, tilan vaimentaminen kasvattaa myös moodin vaimennussuhdetta. Negatiivisen arvon tapauksessa vaikutus on päinvastainen. Esimerkiksi vaimennuksen lisääminen generaattoriin, jonka roottorikulmalla ja nopeudella on korkea osallistumiskerroin suhteessa johonkin moodiin, on tehokkaampaa kuin vaimennuksen lisääminen generaattoriin, jolla vastaava arvo on matala. Arvojen käyttämisen ongelmana säädinten sijoittelussa on, että ne eivät ota huomioon järjestelmän sisääntulomatriisia. Tätä varten on tarkasteltava myös moodien ohjattavuutta, joka ottaa huomioon järjestelmän sisääntulorakenteen.

2.7 Moodien ohjattavuus

Yhtälöissä (2.24) ja (2.25) kuvattiin lineaarinen tilaesitys modaalisessa muodossa, jossa systeemimatriisi on diagonaalinen ja koostuu alkuperäisen järjestelmän ominaisarvoista. Muunnetun järjestelmän sisääntulomatriisi $\Psi\mathbf{B}$ kuvaa järjestelmän moodien ohjattavuutta. Ohjattavuus kuvaa kuinka voimakkaasti systeemin eri moodeihin voidaan vaikuttaa sen eri sisääntulojen avulla. Moodille i se on määritelty sitä vastaavan vasemman ominaisvektorin Ψ_i ja järjestelmän sisääntulomatriisin \mathbf{B} tulona.

$$\mathbf{B}'_i = \Psi_i \mathbf{B} \quad (2.32)$$

Kaikkia moodeja kuvaava moodien ohjattavuusmatriisi on täten.

$$\mathbf{B}' = \Psi \mathbf{B} \quad (2.33)$$

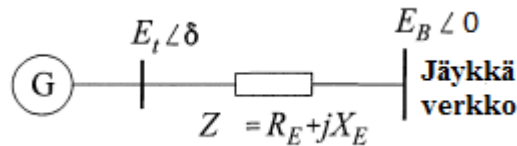
Mikäli matriisin \mathbf{B}' jonkin rivin kaikki alkiot ovat nolliä, ei riviä vastaavaan moodiin voida vaikuttaa järjestelmän sisääntuloilla ja moodin sanotaan olevan ei-ohjattava.

3 Sähkönsiirtojärjestelmien mallintaminen

Tämän luvun tarkoituksena on kuvata, kuinka sähkönsiirtojärjestelmien eri osia mallinnetaan matemaattisesti. Ensin kuvataan yksittäisen generaattorin tilaesitys muodossa olevien differentiaaliyhtälöiden muodostaminen. Toisena kuvataan sähkönsiirtojärjestelmissä käytettävien generaattorien säätöjärjestelmien eli automaattisen jänniteensäätäjän, lisästabilointipiirin ja turbiinin nopeussäätäjän mallintaminen. Kolmantena kuvataan generaattoreita yhdistävän siirtoverkon mallintaminen algebrallisista yhtälöistä koostuvan staattisen mallin avulla. Tämän jälkeen esitetään näiden erilaisten mallien yhdistäminen koko järjestelmää kuvaavaksi malliksi. Viimeisenä kuvataan tarkasteltavat kaksi sähkönsiirtojärjestelmän mallia.

3.1 Generaattorin mallintaminen

Tässä kohdassa mallinnetaan yksittäinen generaattori, joka on kiinni jäykässä verkossa. Jäykällä verkolla tarkoitetaan sähköverkkoa, jonka toimintaan mallinnettavan yksittäisen generaattorin muutokset eivät vaikuta. Jäykkää verkkoa mallinnetaan jännitteellä E_B , jonka suuruus ja kulma ovat vakioita. Generaattorin ja jäykän verkon muodostama järjestelmä on esitetty kuvassa 3.1.



Kuva 3.1. Generaattori kiinnitettynä jäykkään verkkoon impedanssin \underline{Z} läpi. Muokattu (Kundur, 1994, s. 727)

3.1.1 Generaattorin yhtälöt

Seuraava generaattoreiden dynamiikka kuvaava tarkastelu on johdettu (Kundur, 1994) esityksestä. Generaattorimallin tilaesityksessä on kuusi tilamuuttujaa: neljä käämivuota, generaattorin roottorikulma ja pyörimisnopeus. Tarkastellaan ensin generaattorin roottorin dynamiikan mallintamiseen liittyviä yhtälöitä, joista voidaan johtaa neljän tilamuuttujan yhtälöt. Roottorin jännitteille ja käämivoille pätevät seuraavat yhtälöt.

$$E_{fd} = \dot{\Psi}_{fd} + R_{fd}i_{fd} \quad (3.1)$$

$$0 = \dot{\Psi}_{1d} + R_{1d}i_{1d} \quad (3.2)$$

$$0 = \dot{\Psi}_{1q} + R_{1q}i_{1q} \quad (3.3)$$

$$0 = \dot{\Psi}_{2q} + R_{2q}i_{2q} \quad (3.4)$$

$$\Psi_{fd} = L_{ffd}i_{fd} + L_{f1d}i_{1d} - L_{ad}i_d \quad (3.5)$$

$$\Psi_{1d} = L_{f1d}i_{fd} + L_{11d}i_{1d} - L_{ad}i_d \quad (3.6)$$

$$\Psi_{1q} = L_{11q}i_{1q} + L_{aq}i_{1q} - L_{aq}i_q \quad (3.7)$$

$$\Psi_{1d} = L_{aq}i_{1q} + L_{22q}i_{2q} - L_{aq}i_q \quad (3.8)$$

Staattorin terminaalijännitteen E_T d- ja q-komponentit on määritelty seuraavasti.

$$e_d = \dot{\Psi}_d - \Psi_q\omega_r - R_a i_d \quad (3.9)$$

$$e_q = \dot{\Psi}_q + \Psi_d\omega_r - R_a i_q \quad (3.10)$$

Yhtälöissä (3.9) ja (3.10) esiintyvät staattorin käämivuot Ψ on määritelty induktanssien ja staattori- sekä roottorivirtojen avulla seuraavasti.

$$\Psi_d = -(L_{ad} + L_l)i_d + L_{ad}i_{fd} + L_{ad}i_{1d} \quad (3.11)$$

$$\Psi_q = -(L_{aq} + L_l)i_q + L_{aq}i_{1q} + L_{aq}i_{2q} \quad (3.12)$$

Määritellään yhtälöissä (3.11) ja (3.12) esiintyvien induktanssien avulla seuraavat tarkastelua helpottavat induktanssin apumuuttujat.

$$L_{fd} = L_{ffd} - L_{f1d} \quad (3.13)$$

$$L_{1d} = L_{11d} - L_{f1d} \quad (3.14)$$

$$L_{1q} = L_{11q} - L_{aq} \quad (3.15)$$

$$L_{2q} = L_{22q} - L_{aq} \quad (3.16)$$

Roottorin käämeissä kulkevat virrat saadaan ratkaistua induktanssin määritelmän (3.17) avulla.

$$L = \frac{d\Psi}{di} \quad (3.17)$$

$$i_{fd} = \frac{1}{L_{fd}}(\Psi_{fd} - \Psi_{ad}) \quad (3.18)$$

$$i_{1d} = \frac{1}{L_{1d}}(\Psi_{1d} - \Psi_{ad}) \quad (3.19)$$

$$i_{1q} = \frac{1}{L_{1q}}(\Psi_{1q} - \Psi_{aq}) \quad (3.20)$$

$$i_{2q} = \frac{1}{L_{2q}}(\Psi_{2q} - \Psi_{aq}) \quad (3.21)$$

Staattorin ja roottorin käämien ristikkäisvaikutuksista aiheutuvat käämivuot voidaan ratkaista roottorin ja staattorin virtojen sekä induktanssien avulla yhtälöiden (3.22) – (3.26) mukaisesti.

$$\Psi_{ad} = -L_{ads}(-i_d + i_{fd} + i_{1d}) \quad (3.22)$$

$$\Psi_{ad} = -L''_{ads}(-i_d + \frac{\Psi_{fd}}{L_{fd}} + \frac{\Psi_{1d}}{L_{1d}}) \quad (3.23)$$

$$\Psi_{aq} = -L_{aqs}(-i_q + i_{1q} + i_{2q}) \quad (3.24)$$

$$\Psi_{aq} = -L''_{aqs}(-i_q + \frac{\Psi_{1q}}{L_{1q}} + \frac{\Psi_{2q}}{L_{2q}}) \quad (3.25)$$

Yhtälöissä induktanssit L''_{ads} ja L''_{aqs} on määritelty seuraavasti.

$$L''_{ads} = \frac{1}{\frac{1}{L_{ads}} + \frac{1}{L_{fd}} + \frac{1}{L_{1d}}} \quad (3.26)$$

$$L''_{aqs} = \frac{1}{\frac{1}{L_{aqs}} + \frac{1}{L_{1q}} + \frac{1}{L_{2q}}} \quad (3.27)$$

Määritellään seuraavat muuttujat, jotta generaattorin yhtälöt voidaan esittää tilaesitysmuodossa, jossa tilamuuttujien derivaatat ovat ainoastaan järjestelmän tilamuuttujien ja sisääntulojen funktioita. Staattoriin indusoidut jänniteen d- ja q-komponentit esitetään tilamuuttujien avulla yhtälöiden (3.28) ja (3.29) mukaisesti.

$$E''_d = L''_{ads}(\frac{\Psi_{1q}}{L_{1q}} + \frac{\Psi_{2q}}{L_{2q}}) \quad (3.28)$$

$$E''_q = L''_{aqs}(\frac{\Psi_{fd}}{L_{fd}} + \frac{\Psi_{1d}}{L_{1d}}) \quad (3.29)$$

Vastaavasti staattorivirrat i_d ja i_q on määritelty yhtälöissä (3.30) ja (3.31).

$$i_d = \frac{X_{Tq}E_{qN} - R_T E_{dN}}{D} \quad (3.30)$$

$$i_q = \frac{R_T E_{qN} + X_{Td} E_{dN}}{D} \quad (3.31)$$

Yhtälöissä esiintyvät apumuuttujat on määritelty aiemmin kuvattujen muuttujien avulla seuraavasti.

$$E_{dN} = E''_d + E_B \sin \delta \quad (3.32)$$

$$E_{qN} = E_q'' - E_B \cos \delta \quad (3.33)$$

$$X_{Td} = X_E + (L_{ads}'' + L_l) = X_E + X_{ds}'' \quad (3.34)$$

$$X_{Tq} = X_E + (L_{aqs}'' + L_l) = X_E + X_{qs}'' \quad (3.35)$$

$$R_T = R_a + R_E \quad (3.36)$$

$$D = R_T^2 + X_{Tq} X_{Td} \quad (3.37)$$

Staattorijännitteen d- ja q- komponentit voidaan esittää seuraavasti.

$$e_d = -R_a i_d + L_q'' i_q - E_d'' \quad (3.38)$$

$$e_q = -R_a i_q + L_d'' i_d + E_q'' \quad (3.39)$$

Näiden yhtälöiden avulla voidaan johtaa järjestelmän epälineaarinen tilaesityksen yhtälöt.

3.1.2 Generaattorin tilaesitys

Tässä kappaleessa johdetaan käytettävälle generaattorimallille epälineaarinen tilaesitys.

Työssä käytettävän generaattorimallin tilaesityksessä on kuusi tilaa.

$$\mathbf{x} = (\psi_{fd}, \psi_{1d}, \psi_{1q}, \psi_{2q}, \delta, \Delta\omega_r)^T \quad (3.40)$$

Tilat ovat roottorin käämivuot, eli roottorin d- ja q-akseleiden käämien läpi kulkevat magneettivuot, roottorikulma ja roottorikulman muutosnopeus eli generaattorin pyörimisnopeuden poikkeama synkronisesta nopeudesta. Nopeus on esitetty suhteellisena arvona eli poikkeaman osuutena generaattorin normaalista pyörimisnopeudesta ω_0 . Tässä tarkastelussa jäykän verkon jännitteen kulman arvoksi oletetaan 0. Mikäli jännitteellä olisi kulma δ_B , korvattaisiin seuraavassa tarkastelussa roottorikulman δ arvot kulmien erotuksella $\delta - \delta_B$.

Käytettävässä mallissa generaattorilla on kaksi ohjaussignaalia u .

$$u = (T_m, E_{fd})^T \quad (3.41)$$

Generaattorin tilaesityksen ohjaussignaaleita ovat mekaaninen vääntömomentti T_m ja myöhemmin kohdassa 3.2.1 kuvattavan jänniteensäätäjän roottoriin syöttämä jännite E_{fd} . Tilamuuttujien differentiaaliyhtälöissä esiintyy staattorin virtoja ja jännitteitä kuvaavia muuttujia. Koska ne eivät ole tilamuuttujia, on ne eliminotava yhtälöistä ratkaisemalla ne tilamuuttujien ja sisääntulojen funktioina. Yhtälöiden (3.28) ja (3.39) avulla staattorivirrat ja -jännitteet saadaan täten esitettyä seuraavasti.

$$i_d = \frac{X_{Tq} L_{ads}''}{D L_{fd}} \psi_{fd} + \frac{X_{Tq} L_{ads}''}{D L_{1d}} \psi_{1d} - \frac{R_T L_{aqs}''}{D L_{1q}} \psi_{1q} - \frac{R_T L_{aqs}''}{D L_{2q}} \psi_{2q} + E_B \left(-\frac{X_{Tq}}{D} \cos \delta - \frac{R_T}{D} \sin \delta \right) \quad (3.42)$$

$$i_q = \frac{R_T L''_{ads}}{D L_{fd}} \psi_{fd} + \frac{R_T L''_{ads}}{D L_{1d}} \psi_{1d} + \frac{X_{Td} L''_{aqs}}{D L_{1q}} \psi_{1q} + \frac{X_{Td} L''_{aqs}}{D L_{2q}} \psi_{2q} + E_B \left(-\frac{R_T}{D} \cos \delta + \frac{X_{Td}}{D} \sin \delta \right) \quad (3.43)$$

$$e_d = \left(\frac{R_a R_T L''_{aqs} + L''_q X_{Td} L''_{aqs}}{D L_{fd}} \right) \psi_{fd} + \left(\frac{R_a R_T L''_{aqs} + L''_q X_{Td} L''_{aqs}}{D L_{1d}} \right) \psi_{1d} + \left(\frac{-R_a X_{Tq} L''_{ads} + L''_q X_{Td} L''_{ads} - D L''_{aqs}}{D L_{1q}} \right) \psi_{1q} + \left(\frac{-R_a X_{Tq} L''_{ads} + L''_q X_{Td} L''_{ads} - D L''_{aqs}}{D L_{2q}} \right) \psi_{2q} + E_B \left[\left(\frac{L''_q R_T - R_a X_{Tq}}{D} \right) \sin \delta + \left(\frac{-R_a R_T - L''_q X_{Td}}{D} \right) \cos \delta \right] \quad (3.44)$$

$$e_q = \left(\frac{-R_a R_T L''_{aqs} - L''_q X_{Tq} L''_{aqs} + D L''_{aqs}}{D L_{fd}} \right) \psi_{fd} + \left(\frac{-R_a R_T L''_{aqs} - L''_q X_{Tq} L''_{aqs} + D L''_{aqs}}{D L_{1d}} \right) \psi_{1d} + \left(\frac{-R_a X_{Td} L''_{ads} + L''_d R_T L''_{ads}}{D L_{1q}} \right) \psi_{1q} + \left(\frac{-R_a X_{Td} L''_{ads} + L''_d R_T L''_{ads}}{D L_{2q}} \right) \psi_{2q} + E_B \left[\left(\frac{L''_d R_T - R_a X_{Td}}{D} \right) \sin \delta + \left(\frac{R_a R_T + L''_d X_{Tq}}{D} \right) \cos \delta \right] \quad (3.45)$$

Selvennetään yhtälöitä yksinkertaistamalla termien kertoimet. Yhtälöt ovat tällöin seuraavaa muotoa.

$$i_d = p_1 \psi_{fd} + p_2 \psi_{1d} + p_3 \psi_{1q} + p_4 \psi_{2q} + E_B (p_5 \sin \delta + p_6 \cos \delta) \quad (3.46)$$

$$i_q = q_1 \psi_{fd} + q_2 \psi_{1d} + q_3 \psi_{1q} + q_4 \psi_{2q} + E_B (q_5 \sin \delta + q_6 \cos \delta) \quad (3.47)$$

$$e_d = m_1 \psi_{fd} + m_2 \psi_{1d} + m_3 \psi_{1q} + m_4 \psi_{2q} + E_B (m_5 \sin \delta + m_6 \cos \delta) \quad (3.48)$$

$$e_q = n_1 \psi_{fd} + n_2 \psi_{1d} + n_3 \psi_{1q} + n_4 \psi_{2q} + E_B (n_5 \sin \delta + n_6 \cos \delta) \quad (3.49)$$

Kun yhtälöistä (3.1) – (3.4) eliminoidaan ei-tilamuuttujat yhtälöiden (3.42) – (3.45) avulla, saadaan ne epälineaariseen tilaesitysmuotoon, jossa kaikkien tilamuuttujien derivaatat ovat funktioita ainoastaan järjestelmän tilamuuttujista ja syötesignaaleista.

$$\dot{\psi}_{fd} = \frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} \left[\left(-1 + \frac{L''_{ads}}{L_{fd}} - \frac{X_{Tq} (L''_{ads})^2}{D L_{fd}} \right) \psi_{fd} + \left(\frac{L''_{ads}}{L_{1d}} - \frac{X_{Tq} (L''_{ads})^2}{D L_{1d}} \right) \psi_{1d} + \frac{R_T L''_{aqs} L''_{ads}}{D L_{1q}} \psi_{1q} + \frac{R_T L''_{aqs} L''_{ads}}{D L_{2q}} \psi_{2q} + \frac{L''_{ads}}{D} (X_{Tq} E_B \cos \delta + R_T E_B \sin \delta) \right] + \frac{R_{fd}}{L_{ad}} E_{fd} \quad (3.50)$$

$$\dot{\psi}_{1d} = \frac{\omega_0 R_{1d}}{L_{1d}} \left[\left(\frac{L''_{ads}}{L_{fd}} - \frac{X_{Tq} (L''_{ads})^2}{D L_{fd}} \right) \psi_{fd} + \left(-1 + \frac{L''_{ads}}{L_{1d}} - \frac{X_{Tq} (L''_{ads})^2}{D L_{1d}} \right) \psi_{1d} + \frac{R_T L''_{aqs} L''_{ads}}{D L_{1q}} \psi_{1q} + \frac{R_T L''_{aqs} L''_{ads}}{D L_{2q}} \psi_{2q} + \frac{L''_{ads}}{D} (X_{Tq} E_B \cos \delta + R_T E_B \sin \delta) \right] \quad (3.51)$$

$$\dot{\psi}_{1q} = \frac{\omega_0 R_{1q}}{L_{1q}} \left[-\frac{R_T L''_{aqs} L''_{ads}}{D L_{fd}} \psi_{fd} - \frac{R_T L''_{aqs} L''_{ads}}{D L_{fd}} \psi_{1d} + \left(-1 + \frac{L''_{aqs}}{L_{1q}} - \frac{X_{Td} (L''_{aqs})^2}{D L_{1q}} \right) \psi_{1q} + \left(\frac{L''_{aqs}}{L_{2q}} - \frac{X_{Td} (L''_{aqs})^2}{D L_{2q}} \right) \psi_{2q} + \frac{L''_{aqs}}{D} (R_T E_B \cos \delta - X_{Td} E_B \sin \delta) \right] \quad (3.52)$$

$$\dot{\psi}_{2q} = \frac{\omega_0 R_{2q}}{L_{2q}} \left[-\frac{R_T L''_{aqs} L''_{ads}}{D L_{fd}} \psi_{fd} - \frac{R_T L''_{aqs} L''_{ads}}{D L_{fd}} \psi_{1d} + \left(\frac{L''_{aqs}}{L_{1q}} - \frac{X_{Td} (L''_{aqs})^2}{D L_{1q}} \right) \psi_{1q} + \left(-1 + \frac{L''_{aqs}}{L_{2q}} - \frac{X_{Td} (L''_{aqs})^2}{D L_{2q}} \right) \psi_{2q} + \frac{L''_{aqs}}{D} (R_T E_B \cos \delta - X_{Td} E_B \sin \delta) \right] \quad (3.53)$$

Kahden viimeisen tilamuuttujan eli roottorikulman ja roottorin pyörimisnopeuden poikkeaman derivaattojen yhtälöt on määritelty seuraavasti.

$$\dot{\delta} = \omega_0 \Delta \omega_r \quad (3.54)$$

$$\Delta \dot{\omega}_r = \frac{1}{2H} (T_m - T_e - K \Delta \omega_r) \quad (3.55)$$

Roottorikulma kuvaa kuinka paljon generaattorin staattorijännitteen q-akseli on edellä verkon referenssijännitteen R-akselia. Kulman voidaan katsoa koostuvan kahdesta osasta. Ensimmäisen osa on kulma, jolla generaattorin terminaalijännite johtaa referenssijännitteen R-akselia. Toinen osa on generaattorin sisäinen roottorikulma, joka kuvaa kuinka paljon staattorijännitteen q-komponentti johtaa terminaalijännitettä E_T . Graafinen esitys kulmalle on esitetty kuvassa 3.2. Roottorikulman yhtälö on sellaisenaan tilaesitystä varten sopivassa muodossa. Kulmanopeuden yhtälössä esiintyy sähköistä vääntömomenttia kuvaava termi T_e , joka täytyy esittää tilamuuttujien avulla. Vääntömomentin määritelmä on

$$T_e = \Psi_{ad} i_q - \Psi_{aq} i_d. \quad (3.56)$$

Yhtälöiden (3.30), (3.31) ja (3.46) – (3.49) avulla sähköinen vääntömomentti saadaan seuraavaan muotoon.

$$\begin{aligned} T_e = L''_{ads} & \left(-p_1 \psi_{fd} - p_2 \psi_{1d} - p_3 \psi_{1q} - p_4 \psi_{2q} - E_B (p_5 \sin \delta + p_6 \cos \delta) + \frac{\psi_{fd}}{L_{fd}} + \frac{\psi_{1d}}{L_{1d}} \right) \left(q_1 \psi_{fd} + q_2 \psi_{1d} + q_3 \psi_{1q} + q_4 \psi_{2q} + \right. \\ & \left. E_B (q_5 \sin \delta + q_6 \cos \delta) \right) - L''_{ads} \left(-q_1 \psi_{fd} - q_2 \psi_{1d} - q_3 \psi_{1q} - q_4 \psi_{2q} - \right. \\ & \left. E_B (q_5 \sin \delta + q_6 \cos \delta) + \frac{\psi_{1q}}{L_{1q}} + \frac{\psi_{2q}}{L_{2q}} \right) \left(p_1 \psi_{fd} + p_2 \psi_{1d} + p_3 \psi_{1q} + p_4 \psi_{2q} + \right. \\ & \left. E_B (p_5 \sin \delta + p_6 \cos \delta) \right) \end{aligned} \quad (3.57)$$

Sijoittamalla muodostettu T_e roottorikulman derivaatan yhtälöön, saadaan se tilaesitysmuotoon. Näin on kaikille tilamuuttujien derivaatoille on johdettu yhtälöt, joissa ne ovat funktioita ainoastaan toisista tilamuuttujista ja ohjaussignaaleista.

3.1.3 Staattoriyhtälöt ja ulostulot

Sähkönsiirtojärjestelmien mallintamisessa siirtoverkko mallinnetaan usein staattisena käyttäen algebrallisia yhtälöitä. Tämän ratkaisun syyt on kuvattu tarkemmin kohdassa 3.3.3. Siirtoverkon staattisen mallin käyttäminen vaatii kuitenkin, että myös generaattoreiden staattorisuuressa käytetään staattisia malleja, koska muuten verkkoa ja generaattoreita yhdistävät yhtälöt eivät olisi yhdenmukaisia toistensa kanssa (Kundur, 1994). Tämä tarkoittaa, että staattorin jänniteyhtälöissä (3.9) ja (3.10) käämivuon muutoksesta seuraavat termit $\dot{\Psi}_d$ ja $\dot{\Psi}_q$ oletetaan nolliksi. Tällöin yhtälöt saadaan sekä yhdenmukaisiksi verkkoyhtälöiden kanssa että yksinkertaisemmiksi.

Yksittäisen generaattorin verkkoon näkyviä ulostulomuuttujia y ovat tuotetut pätö- ja loisteho P_T ja Q_T sekä generaattorin terminaalijännite E_T .

$$y = (E_T, P_T, Q_T)^T \quad (3.58)$$

Generaattorin staattorisuureet kuvaavat kuinka generaattori näkyy verkkoa kuvaaviin yhtälöihin. Staattorisuureita ovat jännitteen ja virran d- ja q-komponentit, jotka ratkaistaan yhtälöiden (3.46) ja (3.47) avulla. Näiden suureiden avulla voidaan ratkaista myös generaattorin kompleksinen jännite ja sen tuottama pätö- ja loisteho.

$$E_T = e_d + je_q \quad (3.59)$$

$$P_T = e_d i_d + e_q i_q \quad (3.60)$$

$$Q_T = e_q i_d - e_d i_q \quad (3.61)$$

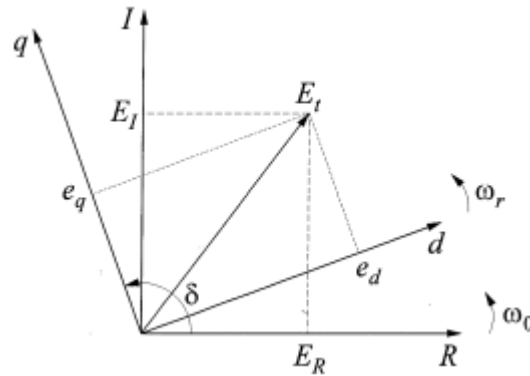
Yksittäisen generaattorin tilaesityksessä jännite- ja virtamuuttujat on kuvattu generaattorin roottorin d- ja q-akselien suhteen. Verkostolaskentaa varten ne on muunnettava koko verkon yhteiseen RI-referenssikoordinaatistoon, jotta kaikki verkkoyhtälöissä käytettävät muuttujat on ilmaistu yhteisen koordinaatiston avulla. Generaattorin staattorijännitteen (3.59) R- ja I-komponenttien muunnokset ovat yhtälöissä (3.62) ja (3.63). Muunnoksen geometrinen tulkinta on esitetty kuvassa 3.2.

$$E_R = e_d \sin \delta + e_q \cos \delta \quad (3.62)$$

$$E_I = e_q \sin \delta - e_d \cos \delta \quad (3.63)$$

Yhtälöt voidaan esittää matriisimuodossa seuraavasti.

$$\begin{bmatrix} E_R \\ E_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \delta & \cos \delta \\ -\cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} \quad (3.64)$$



Kuva 3.2. Generaattorin staattorijännitteen muunnos referenssikoordinaatistoon.
(Kundur, 1994, s. 793).

Generaattorista verkkoon näkyvä staattorin terminaalijännite voidaan esittää referenssikoordinaatistossa kompleksisena muodossa:

$$E_T = E_R + jE_I \quad (3.65)$$

$$E_T = (e_d \sin \delta + e_q \cos \delta) + j(e_q \sin \delta - e_d \cos \delta) \quad (3.66)$$

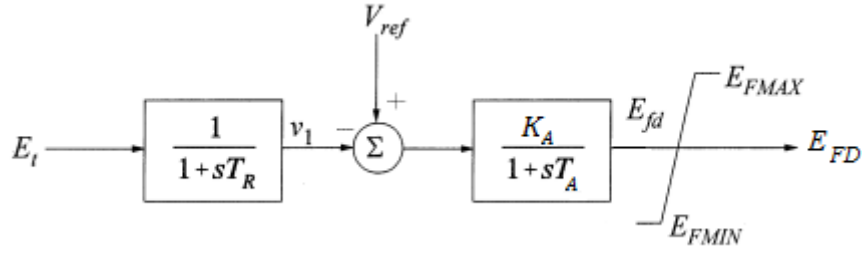
3.2 Ohjausjärjestelmät

Tässä kohdassa kuvataan kolme generaattoreita ohjaavaa järjestelmää, joiden toiminta on keskeistä sähkönsiirtojärjestelmien stabiilisuustarkasteluissa. Ensimmäisenä kuvataan generaattorin magnetointijärjestelmä, toisena magnetointijärjestelmän lisästabilointipiiri ja viimeisenä turbiini sekä sen nopeussäätäjä. Kaikille näille ohjausjärjestelmille muodostetaan niiden toimintaa kuvaavat differentiaaliyhtälöt lohkokaavioesitysten perusteella.

3.2.1 Magnetointijärjestelmä

Magnetointijärjestelmä on toimilaite, jonka avulla tuotetaan generaattorin roottoriin tasavirta säätämällä roottorikäämin jännitettä E_{fd} . Järjestelmässä on takaisinkytkentä generaattorin terminaalijännitteestä E_T . Se säätää täten generaattorin staattorin verkkoon näkyvää jännitettä, ja koko säätöjärjestelmää kutsutaan täten automaattiseksi jännitteensäätäjäksi (AVR, Automatic Voltage Regulator). Tässä työssä tarkasteltavia tehoheilahteluja vaimennetaan ohjaamalla järjestelmää takaisinkytkennän lisäksi erillisillä ohjaussignaaleilla.

Tässä työssä ei kuvata tarkemmin erilaisten AVR-järjestelmien teknisiä yksityiskohtia. Käytettävä malli on esitetty IEEE:n (1981) raportissa AVR-järjestelmien mallintamisesta sähkönsiirtojärjestelmien stabiilisuustarkastelussa. Järjestelmän lohkokaavioesitys on kuvassa 3.3.



Kuva 3.3. AVR-järjestelmän lohkokaaavioesitys. (Kundur, 1994, s. 759).

Muodostetaan tilaesitys kuvan 3.3 lohkokaaavion perusteella. Yksinkertaisen AVR-järjestelmän tiloja ovat sen generaattorille syöttämä jännite E_{fd} ja jänniteanturin suodattama terminaalijännite v_1 . Kun muodostetut yhtälöt (3.69) ja (3.70) yhdistetään kohdassa 3.1.2 esitetyn generaattorin tilaesityksen kanssa, generaattorin sisääntulomuuttuja E_{fd} muutetaan tilamuuttujaksi yhtälön (3.70) mukaisesti. Lisäksi yhtälössä (3.69) esiintyvä generaattorin terminaalijännite E_T esitetään tilamuuttujien funktiona, jolloin yhtälöt saadaan tilaesitysmuotoon.

$$v_1 = \frac{1}{1 + sT_R} E_T \quad (3.67)$$

$$E_{fd} = (V_{ref} - v_1) \frac{K_A}{1 + sT_A} \quad (3.68)$$

$$\dot{v}_1 = -\frac{1}{T_R} v_1 + \frac{1}{T_R} E_T \quad (3.69)$$

$$\dot{E}_{fd} = -\frac{1}{T_A} E_{fd} - \frac{K_A}{T_A} v_1 + \frac{K_A}{T_A} V_{ref} \quad (3.70)$$

$$E_{FD} = \begin{cases} E_{FMAX}, & E_{fd} \geq E_{FMAX} \\ E_{fd}, & E_{FMAX} > E_{fd} > E_{FMIN} \\ E_{FMIN}, & E_{fd} \leq E_{FMIN} \end{cases} \quad (3.71)$$

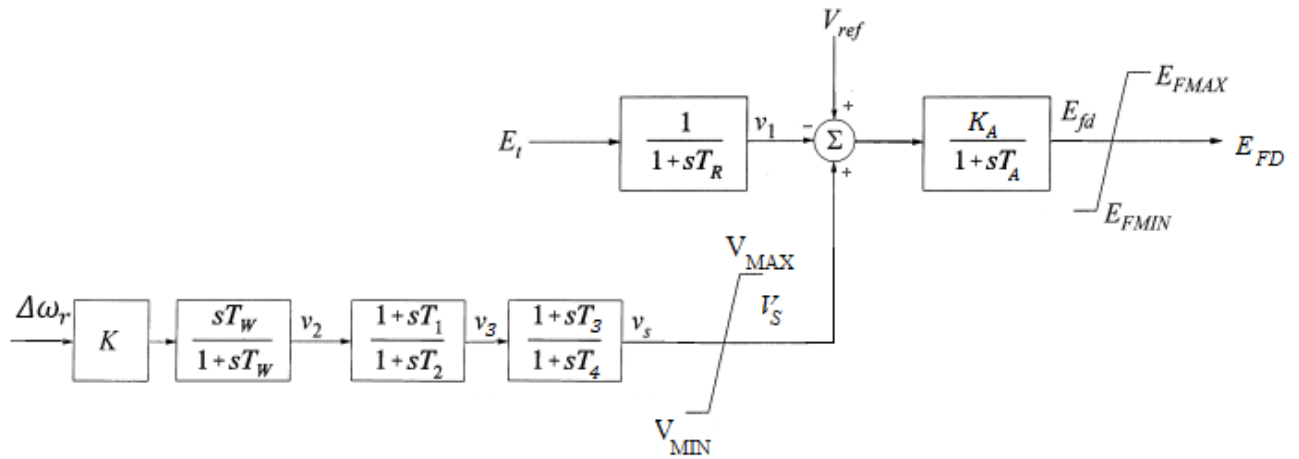
3.2.2 Magnetointijärjestelmän lisästabiloointipiiri

Magnetointijärjestelmän lisästabiloointipiirejä eli PSS-säätimiä on käytetty pitkään sähkönsiirtojärjestelmän sähkömekaanisten heilahtelujen vaimentamiseen. Säätimet toimivat generaattoreiden AVR-järjestelmien kautta tuottamalla referenssijännitettä V_{ref} moduloivan ohjaussignaalin, jonka seurauksena AVR tuottaa generaattorin nopeuden poikkeamaan suhteellisen sähköisen vääntömomentin (Kundur, 1994). Tehokkaat PSS-säätimet tuottavat vaimentavan vääntömomentin laajan taajuusalueen ylitse, mikä on tärkeää mikäli verkossa tapahtuvat muutokset aiheuttaa muutoksia värähtelyjen taajuuksissa. Säätimen takaisinkytkentäsignaalina käytetään useimmin generaattorin roottorin pyörimisnopeutta tai sen tuottamaa pätötehoa. Kaikki käytettävät PSS-säätimet käyttävät takaisinkytkentäsignaaleina generaattoreiden nopeuksien poikkeamia $\Delta\omega_r$.

PSS-säätimen lohkokaavioesitys ja sen yhdistäminen AVR-järjestelmään on esitetty kuvassa 3.4. Kuvan säädin on muodostettu kahdesta lead-lag-lohkosta. Vanhat PSS-ohjaimet saattavat käyttää ainoastaan yhtä, jolloin niiden taajuusvasteen ominaisuudet ovat rajoittuneempia. Tämä heikentää niiden tehokkuutta paikallisten ja alueiden välisten heilahtelujen vaimentamisessa, koska niiden taajuudet poikkeavat toisistaan. Säätimet on aina viritetty tietyn toimintapisteen ympäristössä, joten suurten häiriöiden jälkeen ne voivat vaikuttaa negatiivisesti vaimennukseen ja aiheuttaa generaattorin putoamisen tahdista (Kundur, 1994).

PSS-säätimen voidaan katsoa koostuvan neljästä osasta. Ensimmäisenä syötesignaali syötetään ylipäästösuodattimen läpi, jolloin eliminoidaan signaalin tasapainotilan arvo ja estetään säätimen liian voimakas vaste suurten häiriöiden jälkeen. Suodatettu signaali kulkee tämän jälkeen kahden lead-lag-kompensaattorin läpi. Viimeisenä vaiheena säätimen ulostulosignaali rajoitetaan tiettyjen raja-arvojen välille, jotta se ei saturoisi koko jännitteensäätöjärjestelmää (Larsen et al., 1981).

PSS-säätimien virittämiseen on olemassa useita erilaisia menetelmiä, ja niitä ovat käsitelleet muun muassa (Pal et al., 2005), (Rogers, 2000) ja (Aboul-Ela et al., 1996). Täten käytettävien PSS-säädintöjen virittämisen ei katsota olevan tämän työn kannalta keskeistä, ja PSS-säätimissä käytetään Matlabin Power System Toolbox –lisäosan (Rogers et al., 2008) malleissa käytettäviä parametreja. Parametrit on esitetty työn liitteessä A.



Kuva 3.4. PSS-säädin yhdistettynä AVR-järjestelmään. Muokattu (Kundur, 1994, s. 815).

PSS-säätimen tilamuuttujia v_2 , v_3 ja v_s kuvaavat siirtofunktiot on esitetty yhtälöissä (3.72) – (3.74).

$$v_2 = \frac{sKT_w}{1 + sT_w} \Delta\omega_r \quad (3.72)$$

$$v_3 = \frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} v_2 \quad (3.73)$$

$$v_s = \frac{1 + sT_3}{1 + sT_4} v_3 \quad (3.74)$$

Siirtofunktioiden perusteella tilamuuttujielle saadaan differentiaaliyhtälöt (3.75) – (3.78).

$$\dot{v}_2 = -\frac{1}{T_W} v_2 + KT_W \Delta \dot{\omega}_r \quad (3.75)$$

$$\dot{v}_3 = -\frac{1}{T_2} v_3 + \frac{1}{T_2} v_2 + \frac{T_1}{T_2} \dot{v}_2 = \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2 T_W} \right) v_2 - \frac{1}{T_2} v_3 + \frac{T_1 T_W}{T_2} K \Delta \dot{\omega}_r \quad (3.76)$$

$$\dot{v}_s = -\frac{1}{T_4} v_s + \frac{1}{T_4} v_3 + \frac{T_3}{T_4} \dot{v}_3 = \left(\frac{T_3}{T_2 T_4} - \frac{T_1 T_3}{T_2 T_4 T_W} \right) v_2 + \left(\frac{1}{T_4} - \frac{T_3}{T_2 T_4} \right) v_3 - \frac{1}{T_4} v_s + \frac{T_1 T_3 T_W}{T_2 T_4} K \Delta \dot{\omega}_r \quad (3.77)$$

$$V_S = \begin{cases} V_{\text{MAX}}, & v_s \geq V_{\text{MAX}} \\ v_s, & V_{\text{MAX}} > v_s > V_{\text{MIN}} \\ V_{\text{MIN}}, & v_s \leq V_{\text{MIN}} \end{cases} \quad (3.78)$$

Yhtälöissä esiintyvä $\Delta \dot{\omega}_r$ on ratkaistu generaattoriyhtälöiden yhteydessä kohdassa 3.1.2.

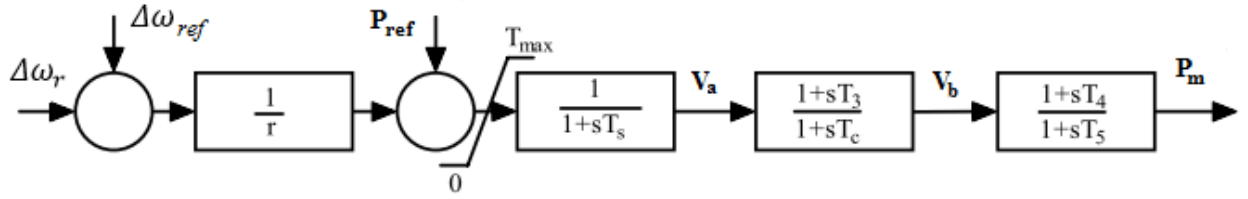
3.2.3 Turbiinit ja nopeussäätäjä

Generaattoreiden mekaanisen tehon lähteinä tutkituissa malleissa käytetään kuvan 3.5 mukaista turbiinia ja sitä ohjaavaa nopeussäätäjää. Näiden tarkoituksena on tuottaa generaattorille mekaaninen vääntömomentti ja säilyttää generaattorin pyörimisnopeus lähellä synkronista taajuutta. Niiden vaikutus on vähäinen järjestelmässä tapahtuviin alle 0,2 Hz:n heilahteluihin ja tätä suuremmilla taajuuksilla olematon (Rogers, 2000). Tarkasteltavien tehoheilahtelujen vaimentaminen turbiinia ohjaamalla ei ole täten mahdollista. Yksittäistä turbiinia ja säädintä kuvaava malli koostuu vakiokertoimesta, yhdestä lag-lohkosta, kahdesta lead-lag-lohkosta ja saturaatiosta. Kuvan 3.5 lohkokaaavioesityksen perusteella turbiinille ja sen nopeussäätäjälle voidaan esittää seuraavat differentiaaliyhtälöt.

$$\dot{P}_m = \frac{T_4}{T_5} \dot{v}_b + \frac{1}{T_5} (v_b - P_m) \quad (3.79)$$

$$\dot{v}_b = \frac{T_3}{T_c} \dot{v}_a + \frac{1}{T_c} (v_a - v_b) \quad (3.80)$$

$$\dot{v}_a = P_{\text{ref}} - \frac{1}{T_s r} (\omega_{\text{ref}} - \omega) - \frac{1}{T_s} v_a \quad (3.81)$$



Kuva 3.5. Turbiinin ja nopeussäätäjän lohkokaaavioesitys. (Chow et al., 2008, s. 119)

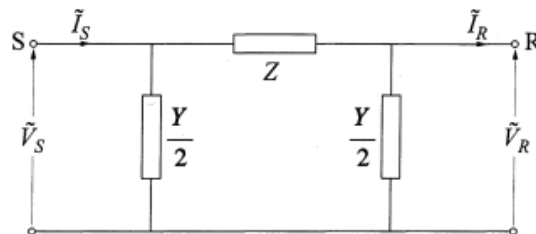
3.3 Verkon mallintaminen

Tässä kohdassa tarkastellaan generaattoreita yhdistävän siirtoverkon mallintamista. Ensin kuvataan yksittäisten johtojen mallintaminen. Tämän jälkeen esitetään koko verkkoa kuvaavien yhtälöiden muodostaminen sekä verkon toimintapisteen ratkaiseminen. Lopuksi tarkastellaan verkkoa ja generaattoreita kuvaavan lineaarisen tilaesityksen muodostamista.

3.3.1 Johdot

Sähkönsiirtojärjestelmien stabiilisuustarkastelussa siirtoverkkoa kuvataan johtojen, solmujen ja muiden verkon komponenttien avulla. Solmut ovat verkon pisteitä, joissa kaksi tai useampia johtoa yhdistyy. Siirtojohtoja voidaan kuvata koottujen parametrien malleilla käyttäen π -sijaiskytkentöjä. Verkko voidaan mallintaa johtojen sijaiskytkentöjen avulla staattisena koottujen parametrien mallina, jossa johtojen toimintaa tarkastellaan ainoastaan niiden päissä.

Siirtojohto voidaan kuvata fysikaalisesti resistanssin, reaktanssin ja suskeptanssin avulla kuvan 3.6 mukaisesti. Johdon impedanssi $\underline{Z} = R + jX$ koostuu johdon resistanssista R ja reaktanssista X . Vastaavasti johdon admittanssi $\underline{Y} = G + jB$ kuvaa johdon sähkökentän aikaansaamaa vuotovirtaa konduktanssin G läpi sekä johdon suskeptanssin B tuottamaa loistehoa. Käytettäessä π -sijaiskytkentää, johdon admittanssi on mallinnettu jakamalla se kahteen yhtäsuureen osaan, jotka sijaitsevat johdon päissä. Todellisuudessa siirtojohtojen parametrit ovat jakautuneet koko johdon pituudelle ja ne on ilmaistu pituusyksikköä kohden. Tällöin π -sijaiskytkennässä parametrien arvot riippuvat johdon pituudesta. Johtojen reaktanssi pituusyksikköä kohden on usein resistanssia huomattavasti suurempi, joten lyhyet johdot mallinnetaan joskus pelkän reaktanssin avulla muiden parametrien ollessa nollia.



Kuva 3.6. Siirtojohdon π -sijaiskytkentä. (Kundur, 1994, s. 207).

3.3.2 Kuormat

Sähkönsiirtojärjestelmissä kuormia kuvaavat mallit jaetaan kahteen eri luokkaan: staattisiin ja dynaamisiin. Staattinen kuormamalli ilmaisee kuormassa kulutetun pätö- ja loistehon algebrallisena funktiona kuorman jännitteestä (Kundur, 1994). Tässä työssä kuormat mallinnetaan staattisina. Käytettävä kuormamalli kuvaa pätö- ja loistehon polynomimuotoisilla ZIP-malleilla (impedanssi Z , virta I , teho P) (3.82) ja (3.83) mukaisesti.

$$P = P_0[p_1V^2 + p_2V + p_3] \quad (3.82)$$

$$Q = Q_0[q_1V^2 + q_2V + q_3] \quad (3.83)$$

Yhtälöiden mukaiset kuormat koostuvat vakioimpedanssista, vakiovirrasta ja vakiotehosta. Kertoimien p_i ja q_i summat ovat 1 ja ne kuvaavat jokaisen osuuden suuruuden kuormassa. Tässä työssä kuormien pätöteho-osuudet kuvataan 50 % vakioimpedanssina ja 50 % vakiovirtana ja loisteho-osuudet on mallinnettu pelkällä vakioimpedanssilla. Kuormien mallintamisen vaikutuksia sähkönsiirtojärjestelmien stabiilisuustarkastelussa on kuvannut tarkemmin (Concordia et al., 1982).

3.3.3 Siirtoverkon yhtälöt

Sähkönsiirtojärjestelmiin liittyvä dynamiikka, josta stabiilisuustarkastelussa ollaan kiinnostuneita, liittyy generaattoreiden toimintaan. Generaattoreihin verrattuna siirtoverkon dynamiikka on hyvin nopeaa ja lyhytaikaista (Kundur, 1994). Lisäksi siihen ei liity sellaisia ilmiöitä, jotka ovat stabiilisuustarkastelun kannalta keskeisiä. Siirtoverkon erittäin nopean dynamiikan takia sen mallintaminen simuloinnissa vaatisi erittäin lyhyiden aika-askelten käyttämistä, mikä kasvattaisi laskentatyön määrää suuresti. Näin ollen siirtoverkkoa voidaan stabiilisuustarkasteluissa kuvata staattisella mallilla algebrallisten yhtälöiden avulla, kun taas generaattorit esitetään käyttäen differentiaaliyhtälöitä kohdan 3.1.2 mukaisesti.

Siirtoverkon solmujen jännitteiden ja virtojen välinen suhde voidaan esittää muodostamalla virtayhtälöt solmupistemenetelmällä. Vaihtoehtoisesti yhtälöt voitaisiin muodostaa verkon silmukoille. Solmupistemenetelmän etuna on kuitenkin, että muodostettavien riippumattomien solmuyhtälöiden määrä on pienempi kuin silmukayhtälöiden. Virtayhtälöissä käytetään verkon johtojen kokonaisadmittansseja, jotka on muodostettu johtojen tunnettujen impedanssien ja admittanssien avulla. Verkko kuvataan solmupistemenetelmässä sen admittanssimatriisin avulla seuraavasti.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1N} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{N1} & Y_{N2} & \dots & Y_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix} \quad (3.84)$$

Matriiseissa alkio on määritelty seuraavasti.

N	Verkon solmujen lukumäärä
Y_{ii}	Solmun i itseisadmittanssi
Y_{ij}	Solmujen i ja j keskeisadmittanssi eli solmuja yhdistävien johtojen admittanssien vastaluku
V_i	Solmun i kompleksinen jännite
I_i	Solmussa i verkkoon syötettävä kompleksinen virta

Generaattoreiden verkkoon syöttämät solmuvirrat määritellään niiden differentiaaliyhtälöillä kuvatussa dynamiikasta ratkaistavien solmun kompleksisen jännitteen kompleksikonjugaatin sekä pätö- ja loistehon avulla.

$$I = \frac{S^*}{V^*} = \frac{P - jQ}{V^*} \quad (3.85)$$

Yhtälössä V^* ja S^* ovat jännitteen ja näennäistehon kompleksikonjugaatteja. Verkon yhtälöt ovat täten muotoa

$$\begin{bmatrix} \frac{P_1 - jQ_1}{V_1^*} \\ \frac{P_2 - jQ_2}{V_2^*} \\ \vdots \\ \frac{P_N - jQ_N}{V_N^*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1N} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{N1} & Y_{N2} & \dots & Y_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix}. \quad (3.86)$$

Yhtälöstä (3.86) nähdään, että solmuvirtatermit yhtälön vasemmalla puolella ovat nollia, jos solmun tuottama tai kuluttama näennäisteho on nolla.

3.3.4 Verkon tehonjako ja tasapainotilan ratkaiseminen

Verkon epälineaarista simulointia ja sen lineaarisen tilaesityksen luomista varten on ratkaistava verkon tehonjako. Se kuvaa verkon solmujen jännitteiden suuruudet ja kulmat sekä solmujen tuottaman ja kuluttaman pätö- ja loistehon tasapainotilassa. Tehonjaon laskeminen tehdään hyödyntäen yhtälössä (3.86) esitettyjä verkon yhtälöitä. Seuraava kuvaus tehonjaon ratkaisemiseen käytettävästä menetelmästä perustuu (Grainger et al., 1994) esitykseen. Tehonjakoa varten verkon solmut jaetaan kolmeen luokkaan.

1. PU-solmut
2. PQ-solmut
3. Uδ-solmut

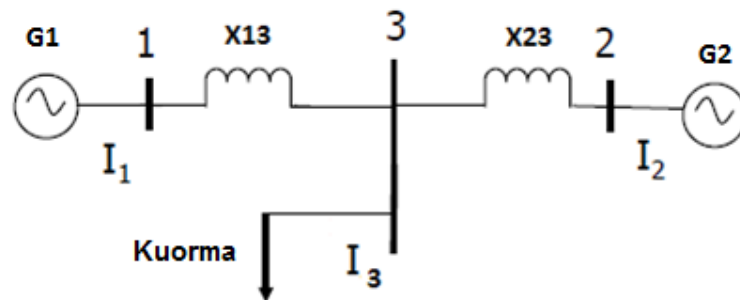
PU-solmut ovat generaattoreita, joiden tuottama pätöteho ja jännitteen itseisarvo tunnetaan. PQ-solmuina kuvataan kuormat, joille on tunnettu pätö- ja loistehon kulutus. Myös verkon solmut, jotka eivät tuota tai kuluta tehoa määritellään PQ-solmuiksi P:n ja Q:n arvoilla 0. Viimeinen solmutyyppi on referenssisolmuna toimiva Uδ-solmu, joita verkossa on ainoastaan yksi. Tälle solmulle sekä jännitteen itseisarvo että kulma ovat tunnettuja. Tällä solmulla on kaksi tarkoitusta. Ensimmäisenä se antaa verkon jännitteiden

kulmille referenssiarvon. Toiseksi se tasapainottaa tehonjakolaskelmaa antamalla riittävän määrän pätö- ja loistehoa, jotta aluksi tuntemattomat verkon tehohäviöt saadaan kompensoitua. Tätä tuotantoa varten referenssisolmuksi on aina valittava solmu, jossa on generaattori.

Tehonjaossa ratkaistaan kaikkien verkon solmujen jännitteiden itseisarvot sekä kulmat. Tarkastellaan verkkoa, jossa on N solmua, joista N_{PQ} on PQ-solmuja ja N_{PU} PU-solmuja. Näin ollen verkon yhtälöissä on $2N_{PQ} + N_{PU}$ tuntematonta muuttujaa. Muodostamalla pätöteho-yhtälöt verkon PU-solmuille, saadaan N_{PU} yhtälöä. Lisäksi PQ-solmujen pätö- ja loistehoyhtälöistä saadaan $2N_{PQ}$ yhtälöä. Näin päästään tilanteeseen, jossa ratkaistavia yhtälöitä on yhtä monta kuin tuntemattomia muuttujia ja kaikki muuttujat ovat ratkaistavissa. Yhtälöt ovat epälineaarisia, joten niiden analyyttinen ratkaiseminen on työlästä. Tämän takia tehonjako ratkaistaan numeerisesti iteroimalla käyttäen esimerkiksi Gaussin-Seidelin menetelmää tai Newtonin-Raphsonin menetelmää. Menetelmät on kuvattu muun muassa Elovaaran ja Haaran (2011) teoksessa sähköverkoista. Tässä työssä tarkasteltavien sähkönsiirtojärjestelmien tehonjaot ratkaistaan Newton-Raphsonin menetelmällä käyttäen Matlabin Power System Toolbox –lisäosaa (Rogers et al., 2008). Työssä tarkasteltavien verkkomallien ratkaistut tehonjaot on esitetty liitteissä A ja B.

3.4 Generaattori- ja verkkoyhtälöiden yhdistäminen

Tässä kohdassa kuvataan periaatteellisella tasolla, kuinka staattisten verkkoyhtälöiden avulla voidaan ratkaista dynaamisten generaattoreiden väliset ristikkäisvaikutukset. Tarkastellaan kuvan 3.7 mukaista verkkoa, joka koostuu kahdesta generaattorista ja yhdestä kuormasta. Käytetään generaattoreiden mallintamisessa klassista generaattorimallia, jossa jokainen generaattori mallinnetaan ainoastaan kahden tilamuuttujan δ ja ω avulla (Kundur, 1994).



Kuva 3.7. Kahden generaattorin ja yhden kuorman esimerkiverkko.

Klassisessa mallissa generaattoreita voidaan kuvata seuraavilla differentiaaliyhtälöillä.

$$\dot{\delta}_1 = \omega_0 \omega_1 \quad (3.87)$$

$$\dot{\omega}_1 = \frac{1}{2H} (T_{m1} - \frac{|V_1||V_3|}{X_{13}} \sin(\delta_1 - \delta_3)) \quad (3.88)$$

$$\dot{\delta}_2 = \omega_0 \omega_2 \quad (3.89)$$

$$\dot{\omega}_2 = \frac{1}{2H} (T_{m2} - \frac{|V_2||V_3|}{x_{23}} \sin(\delta_2 - \delta_3)) \quad (3.90)$$

Yhtälöissä esiintyy solmun 3 jännitteen kulma δ_3 , joka ei ole tilamuuttuja. Linearisoimalla järjestelmä siten, että δ_3 oletetaan vakioksi, generaattoreiden ristikkäisvaikutuksia ei saada kuvattua tilaesityksessä. Esitetään δ_3 verkkoyhtälöiden avulla funktiona tilamuuttujista δ_1 , ω_1 , δ_2 ja ω_2 . Verkkoyhtälöt kuvan 3.7 mukaiselle verkolle ovat

$$\begin{bmatrix} \frac{P_1 - jQ_1}{V_1^*} \\ \frac{P_2 - jQ_2}{V_2^*} \\ \frac{P_3 - jQ_3}{V_3^*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & 0 & Y_{13} \\ 0 & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}. \quad (3.91)$$

Määritellään jännitteet niiden itseisarvon ja kulman avulla.

$$V_i = |V_i|(\cos \delta_i + j \sin \delta_i) \quad (3.92)$$

Kirjoittamalla yhtälöt auki saadaan

$$\begin{aligned} P_1 - jQ_1 = & [Y_{11}|V_1|(\cos \delta_1 + j \sin \delta_1) + Y_{13}|V_3|(\cos \delta_3 + j \sin \delta_3)]|V_1|(\cos \delta_1 - j \sin \delta_1) \end{aligned} \quad (3.93)$$

$$\begin{aligned} P_2 - jQ_2 = & [Y_{22}|V_2|(\cos \delta_2 + j \sin \delta_2) + Y_{23}|V_3|(\cos \delta_3 + j \sin \delta_3)]|V_2|(\cos \delta_2 - j \sin \delta_2) \end{aligned} \quad (3.94)$$

$$\begin{aligned} P_3 - jQ_3 = & [Y_{31}|V_1|(\cos \delta_1 + j \sin \delta_1) + Y_{32}|V_2|(\cos \delta_2 + j \sin \delta_2) + \\ & Y_{33}|V_3|(\cos \delta_3 + j \sin \delta_3)]|V_3|(\cos \delta_3 - j \sin \delta_3) \end{aligned} \quad (3.95)$$

Tarkastellaan kahden ensimmäisen yhtälön reaalisia. Yhtälöt voidaan esittää seuraavasti.

$$P_1 = Y_{13}|V_1||V_3|\sin(\delta_1 - \delta_3) \quad (3.96)$$

$$P_2 = Y_{23}|V_2||V_3|\sin(\delta_2 - \delta_3) \quad (3.97)$$

Eliminoimallaan yhtälöstä (3.96) $|V_3|$ ja muodostetaan yhtälö kulmalle δ_3 yhtälön (3.97) avulla.

$$|V_3| = \frac{P_1}{Y_{13}|V_1|\sin(\delta_1 - \delta_3)} \quad (3.98)$$

$$P_2 = \frac{Y_{23}|V_2|P_1\sin(\delta_2 - \delta_3)}{Y_{13}|V_1|\sin(\delta_1 - \delta_3)} \quad (3.99)$$

Kulman δ_3 ratkaiseminen näistä yhtälöistä analyttisesti on mahdollista. Kulma on kuitenkin hyvin monimutkainen funktio tilamuuttujista δ_1 ja δ_2 . Tämän takia lineaarisesta mallia muodostettaessa ei ole realistista johtaa ensin analyttisesti ristikkäisvaikutuksia

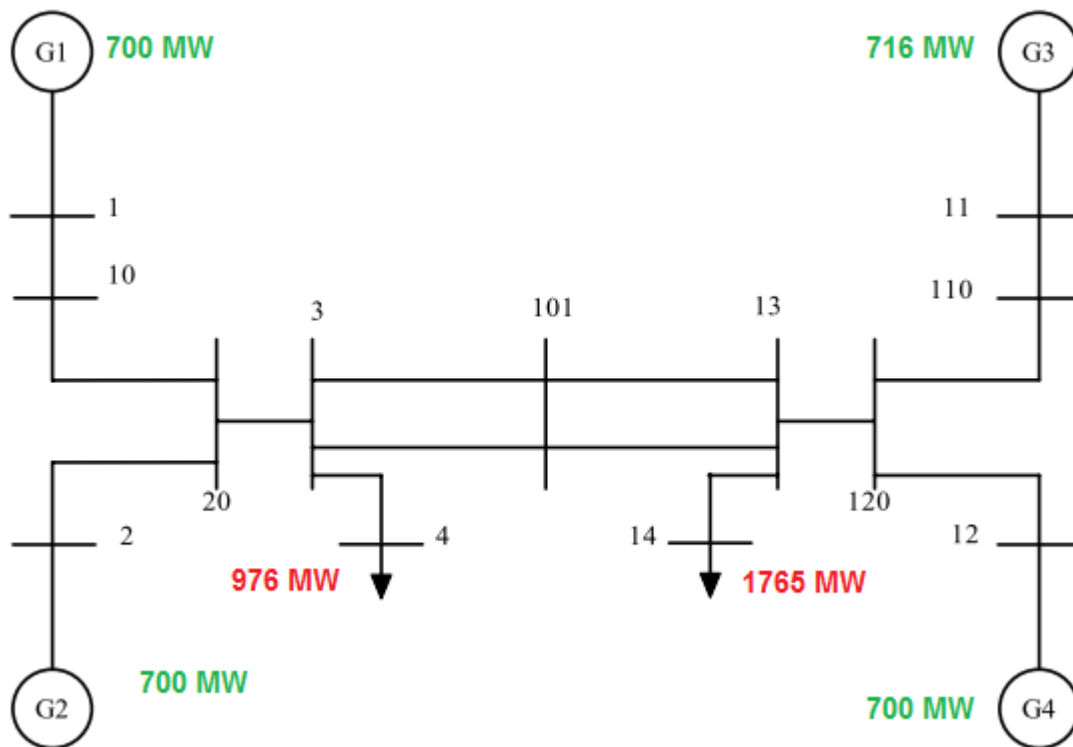
generaattoreiden välille ja suorittaa sen jälkeen linearisointia edes hyvin yksinkertaisille verkoille. Tässä työssä käytetään tästä syystä Matlabin Power System Toolbox –lisäosaa (Rogers et al., 2008) lineaaristen tilaesitysten muodostamiseen tarkasteltaville sähkönsiirtojärjestelmille. Käytetyssä linearisointimenetelmässä järjestelmää simuloidaan siten, että kaikkia tilamuuttujia ja ohjauksia poikkeutetaan yksitellen erittäin vähän niiden tasapainotilan arvoista, ja yhtälöiden (2.5) ja (2.6) mukaiset lineaarisen tilaesityksen matriisit muodostetaan tila- ja ulostulomuuttujien muutosten perusteella numeerisesti.

3.5 Tutkittavat sähkönsiirtojärjestelmien mallit

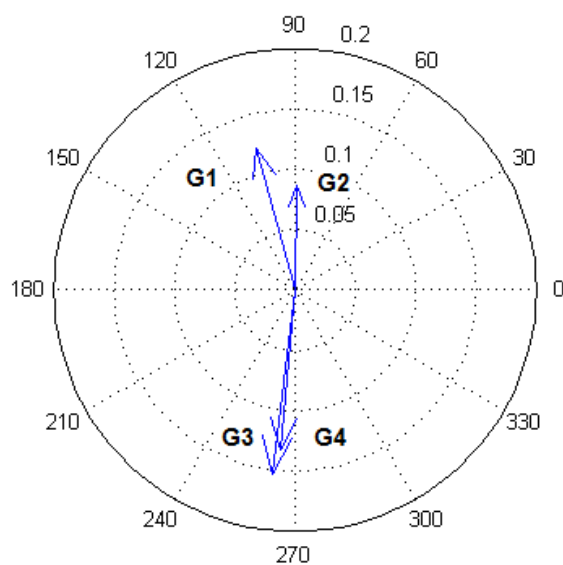
Tässä kohdassa esitellään lyhyesti työssä tarkasteltavat kaksi sähkönsiirtojärjestelmän mallia. Ensin kuvataan neljän generaattorin ja kahden alueen sähkönsiirtojärjestelmän malli. Tämän jälkeen kuvataan monimutkaisempi Uuden-Englannin ja New Yorkin 16 generaattorin sähkönsiirtojärjestelmän malli. Lopuksi kuvataan yleisesti kummankin järjestelmän mallintamista tässä työssä.

3.5.1 Neljän generaattorin sähkönsiirtojärjestelmän malli

Tarkasteltava neljän generaattorin järjestelmän malli on kuvattu muun muassa (Klein et al., 1991) ja (Rogers, 2000). Mallia ja sen erilaisia muunnoksia käytetään usein esimerkkeinä kirjallisuudessa, sillä se on varsin yksinkertainen, mutta siinä esiintyy silti useita sähkönsiirtojärjestelmien tehoheilahteluihin liittyviä ilmiöitä. Verkkoa kuvaava yksivaiheinen kytkentä on esitetty kuvassa 3.8. Verkossa kaksi aluetta on liitetty toisiinsa kahdella rinnakkaisella siirtojohdolla. Kummallakin alueella on kaksi generaattoria ja yksi kuorma. Generaattorit sijaitsevat solmuissa 1, 2, 11 ja 12 ja niiden parametrit ovat identtiset hitausvakioita lukuun ottamatta. Tarkasteltavassa tehonjakotilanteessa verkon kuormat eroavat toisistaan, jolloin alueiden välillä siirtyy tehoa. Vasemmanpuoleisen alueen solmussa 4 sijaitseva kuorma on 976 MW ja oikeanpuoleisen alueen kuorma solmussa 14 on suuruudeltaan 1765 MW. Tämän seurauksena verkon tasapainotilassa vasemmanpuoleiselta alueelta siirtyy noin 400 MW tehoa oikeanpuoleisella alueelle. Järjestelmässä esiintyy alueiden välinen moodi noin taajuudella 0,67 Hz. Alueiden välinen moodi voidaan tunnistaa tarkastelemalla sitä vastaavan oikean ominaisvektorin generaattoreiden roottorikulmia vastaavia elementtejä. Ne kuvaavat moodin muotoa eli mitkä generaattorit heilahtelevat koherentteina ryhminä. Muoto on esitetty kuvassa 3.9. Kuvasta nähdään, että generaattoreiden 1 ja 2 roottorikulmat heilahtelevat vastakkaisessa vaiheessa verrattuna generaattoreiden 3 ja 4 kulmiin, mikä on ominaista alueiden väliselle moodille. Järjestelmää kuvaavat generaattoreiden, johtojen ja säätöjärjestelmien parametrit on esitetty liitteessä A.



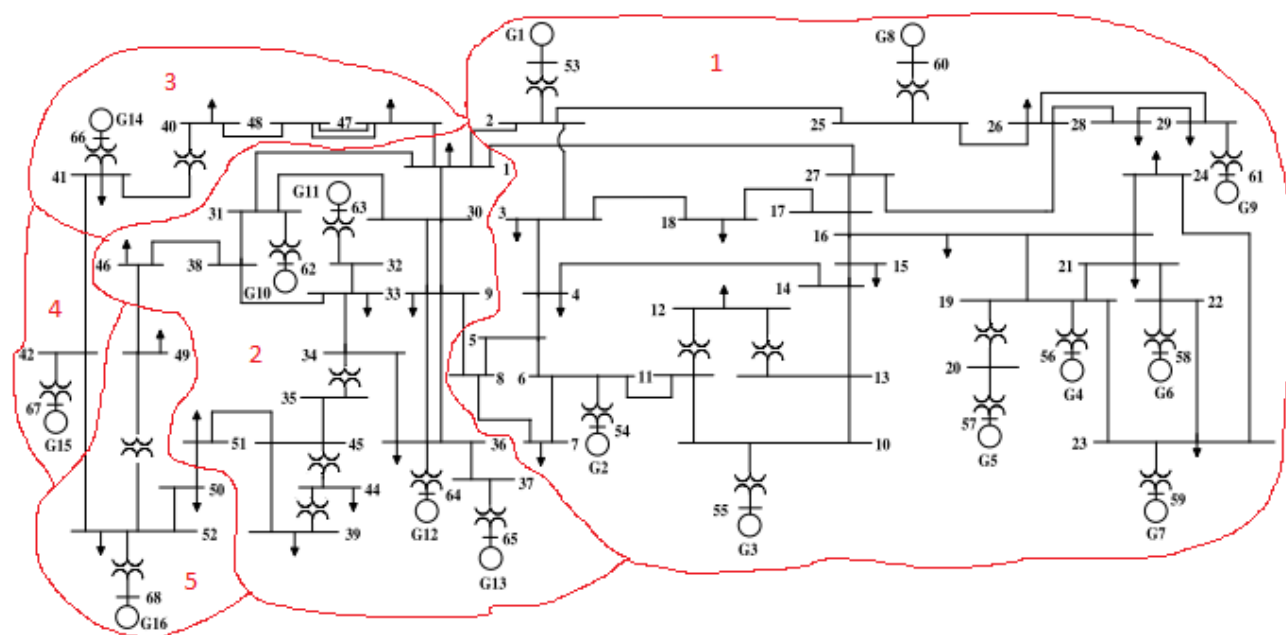
Kuva 3.8. Neljän generaattorin sähkönsiirtojärjestelmän mallin yksivaiheinen sijaiskytkentä. Tuotanto on merkitty vihreällä ja kuormat punaisella. Muut numerot kuvaavat verkon solmuja. (Rogers, 2000).



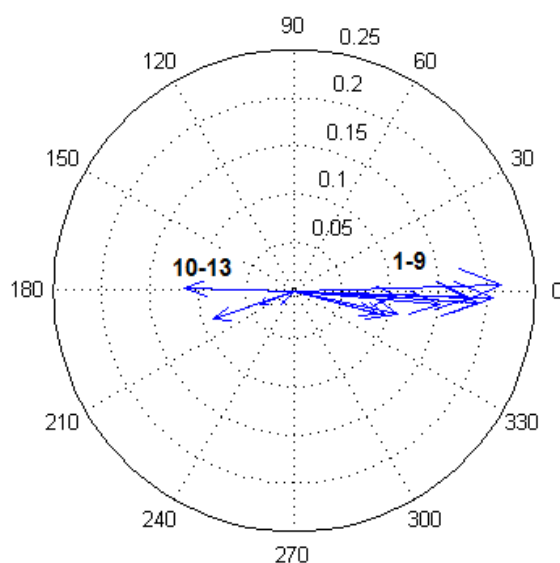
Kuva 3.9. Neljän generaattorin sähkönsiirtojärjestelmän mallin alueiden välisen värähtelyn generaattoriryhmät. Samansuuntaiset vektorit kuvaavat samassa vaiheessa heilahtelevia generaattoreita.

3.5.2 Uuden-Englannin ja New Yorkin sähkönsiirtojärjestelmän malli

Toinen tässä työssä tarkasteltava sähkönsiirtojärjestelmä on 16 generaattorin ja 68 solmun Uuden-Englannin ja New Yorkin malli. Järjestelmää on tutkittu paljon ja se on kuvattu muun muassa (Pal et al., 2005) ja (Rogers, 2000) teoksissa sähkönsiirtojärjestelmistä. Verkon yksivaiheinen kytkentä ja jako alueisiin on esitetty kuvassa 3.10. Verkon generaattorit 1–9 kuvaavat Uuden-Englannin generaattoreita ja generaattorit 10–13 muodostavat New Yorkin sähkönsiirtojärjestelmän. Viimeiset generaattorit 14–16 ovat New Yorkin sähkönsiirtojärjestelmään liittyvien alueiden generaattoriekvivalenteja. Järjestelmän alueiden väliset moodit ovat seuraavien alueiden välillä: 1–2, 2–4, 3–4 ja 3–5. Moodien taajuudet ovat 0,68 Hz, 0,39 Hz, 0,79 Hz ja 0,52 Hz. Alueiden 1 ja 2 välinen moodi taajuudella 0,68 Hz on moodeista ainoa, jossa ei ole mukana generaattoriekvivalenteilla kuvattuja alueita. Näin ollen tässä työssä keskitytään ainoastaan sen vaimentamiseen ja suunnitellut säätimet ohjaavat ainoastaan näiden alueiden generaattoreita. Moodin muoto on esitetty kuvassa 3.11. Nähdään, että Uuden-Englannin generaattorit 1–9 heilahtelevat koherentisti lähes täysin vastakkaisessa vaiheessa New Yorkin keskenään koherentteihin generaattoreihin 10–13 nähden.



Kuva 3.10. Uuden-Englannin ja New Yorkin sähkönsiirtojärjestelmän mallin yksivaiheinen sijaistykentä, solmujen numerointi ja jako alueisiin. Muokattu (Hasanovic 2001, s.20).



Kuva 3.11. Uuden-Englannin ja New Yorkin sähkönsiirtojärjestelmän mallin alueiden 1 ja 2 välisen värähtelyn generaattoriryhmät. Samansuuntaiset vektorit kuvaavat samassa vaiheessa heilahtelevia generaattoreita.

3.5.3 Lineaarinen mallintaminen

Järjestelmien lineaarista mallintamista varten kummassakin järjestelmässä kaikki generaattorit mallinnetaan kohdassa 3.1.2 esitetyillä malleilla, joissa jokaisella generaattorilla on kuusi tilamuuttujaa. Neljän generaattorin järjestelmän mallin linearisoidussa tilaesityksessä on mallinnettu generaattoreiden lisäksi turbiinit nopeussäätäjiineen, automaattiset jänniteensäätäjät ja PSS-säätimet kaikissa generaattoreissa. Järjestelmän lineaarisen tilaesityksen tilojen määrä eli mallin kertaluku on 56. Uuden-Englannin ja New Yorkin sähkönsiirtojärjestelmän mallissa ei mallinneta turbiineja ja PSS-säätimet on mallinnettu ainoastaan generaattoreissa 1–12. Järjestelmän linearisoidun tilaesityksen kertaluku on 148.

Lineaarisen tilaesityksen matriisien analyttistä ratkaisemista varten tarvittavat differentiaaliyhtälöt, jotka kuvaavat kaikkien generaattoreiden tilamuuttujien ristikkäisvaikutukset, eivät ole suoraan saatavilla. Yhtälöiden muodostaminen vaatisi algebrallisten verkkoyhtälöiden eliminoimisen ja verkkoa kuvaavien muuttujien esittämistä pelkästään generaattoreiden tilamuuttujien avulla. Tämä on hyvin työlästä jopa erittäin yksinkertaisilla järjestelmillä, kuten kohdan 3.4 esimerkki osoitti. Näin ollen tarkasteltavien järjestelmien mallintamisen ei katsota kuuluvan tämän työn keskeisiin ongelmiin. Lineaarisen tilaesityksen muodostamista varten kumpaakin järjestelmää kuvaavat yhtälöt on linearisoitu kohdan 3.3.4 mukaisesti tehonjaolla ratkaistun toimintapisteen ympärillä. Tässä työssä toimintapisteen ratkaisu ja järjestelmän linearisointi tehdään käyttämällä Matlabin Power System Toolbox –lisäosaa (Rogers et al., 2008).

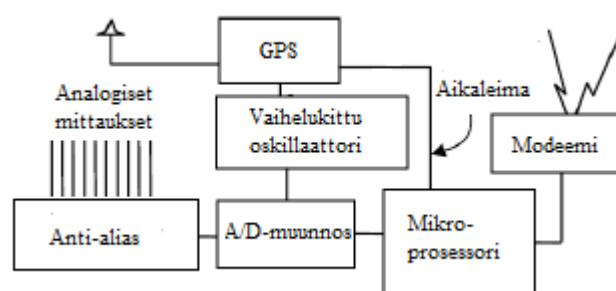
4 Laajan alueen mittausjärjestelmä

Tässä luvussa esitetään lyhyt katsaus laajan alueen mittausjärjestelmiin (Wide-Area Measurement System, WAMS) ja sen sovelluksiin sähkönsiirtojärjestelmissä keskittyen etenkin säätösovelluksiin. WAMS-järjestelmä tekee mittauksia eri puolella sähköverkkoa ja kokoaa mittausdatan erilaisten sovellusten käyttöön. Järjestelmä mahdollistaa täten keskitettyjen säätöalgoritmien käyttämisen sähkönsiirtojärjestelmissä. Ensimmäiseksi kuvataan WAMS-järjestelmän käyttämien mittalaitteiden sekä koko järjestelmän rakenne. Toiseksi esitellään WAMS-järjestelmän erilaisia sovelluksia sähkönsiirtojärjestelmissä. Kolmanneksi esitetään WAMS-järjestelmää hyödyntäviä säätörakenteita ja kuvataan käytettävä hierarkkinen rakenne. Viimeiseksi tarkastellaan viiveiden roolia WAMS-järjestelmissä ja niiden sovelluksissa.

4.1 Järjestelmän rakenne

Tietokonepohjaisten mittaus- sekä synkronointiteknologioiden kehitys on luonut mahdollisuuden käyttää osoitinsuureiden mittauksia reaaliaikaisissa sovelluksissa. Osoitinsuureet ovat perustyökaluja vaihtovirtapiirien analyysissä, ja niiden avulla voidaan esittää piirin tasapainotilan aaltomuotoja ja taajuuksia. Vaikka järjestelmä ei olisikaan aivan tasapainotilassa, ovat osoitinsuureet silti toimiva tapa kuvata järjestelmän toimintaa (Centeno et al., 1993).

PMU (Phasor Measurement Unit) on mittauslaite, joka ottaa näytteitä jännitteen ja virran aaltomuodosta ja hyödyntää GPS-laitteesta saatavaa signaalia mittauksen synkronisointia varten. PMU-laitteen avulla voidaan mitata esimerkiksi jännitteiden kulmia eri puolilla sähköverkkoa. Kuvassa 4.1 on esitetty PMU-laitteen malli. Järjestelmä antaa mittauksille aikaleiman. Tämä mahdollistaa verkon tilan valvonnan keskitetysti, sillä aikaleimojen avulla verkon tila voidaan estimoida verkon eri kohdissa tehtyjen saman ajanhetken mittauksen avulla (Phadke et al., 2008).



Kuva 4.1. PMU-mittalaitteen lohkokaavioesitys. Muokattu (Phadke et al., 2008)

WAMS-järjestelmässä eri puolilla verkkoa sijaitsevat PMU:t tekevät aikaleimattuja mittauksia verkon jännitteistä ja virroista. Tehdyt mittaukset tallennetaan paikallisiin tallennuslaitteisiin, jotka lähettävät ne keskitettyyn tallennuslaitteeseen (Phasor Data Concentrator). Keskitetystä tallennuslaitteesta mittausdata on reaaliaikaisesti saatavissa erilaisten valvonta- ja ohjaussovellusten käyttöön. Tallennuslaitteiden muita tehtäviä ovat muun muassa huonojen mittauksen hylkääminen ja eri puolilta verkkoa saapuvan

mittausdatan muokkaaminen koherenteiksi rakenteiksi, joita voidaan hyödyntää erilaisissa sovelluksissa. (Taylor et al., 2005)

4.2 Sovelluksia

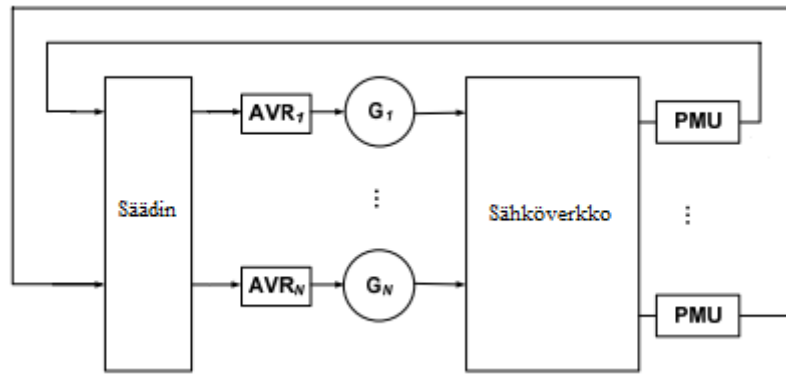
WAMS-järjestelmillä on useita erilaisia käyttösovelluksia esimerkiksi sähköverkkojen valvonnan, mallintamisen ja säädön aloilla (Burnett et al., 1994). IEEE:n raportissa vuoden 2003 sähkökatkoista suurimpana syynä suurihäiriöihin pidettiin luotettavan reaaliaikaisen mittausdatan puutetta (Andersson et al., 2005). Raportti ehdotti WAMS-järjestelmiä potentiaalisena teknologiaratkaisuna verkkojen tilan parempaan tarkkailuun. Järjestelmän avulla verkkojen vaaratilanteet voitaisiin havaita riittävän ajoissa, jolloin on mahdollista suorittaa korjaavia toimenpiteitä (Hauer et al., 2004). Samanaikaisesti tehdyt mittaukset mahdollistavat järjestelmän eri kohdissa tapahtuvien värähtelyjen tarkkailun vikatilanteiden jälkeen. Tällä tavoin hankittua mittausdataa voidaan käyttää muun muassa simulointimallien validoimiseen (Burnett et al., 1994). Tällä hetkellä WAMS-järjestelmiä käytetään muun muassa Norjassa (Leirbukt et al., 2006) ja Japanissa (Ota et al., 2005).

Sähkönsiirtojärjestelmien säädössä WAMS-järjestelmää on käytetty esimerkiksi verkon luotettavuuden parantamiseen (Karlsson et al., 2004). Kirjallisuudessa on esitetty säätimiä, jotka ohjaavat esimerkiksi generaattoreita (Yuxiao et al., 2009) tai staattisia loistehokompensaattoreita kautta (Chauhudri et al., 2004). PMU-laitteiden avulla tehtyjen mittausten hyödyntämisen on havaittu mahdollistavan paikallisia menetelmiä tehokkaamman alueiden välisten heilahtelujen vaimentamisen (Aboul-Ela et al., 1996).

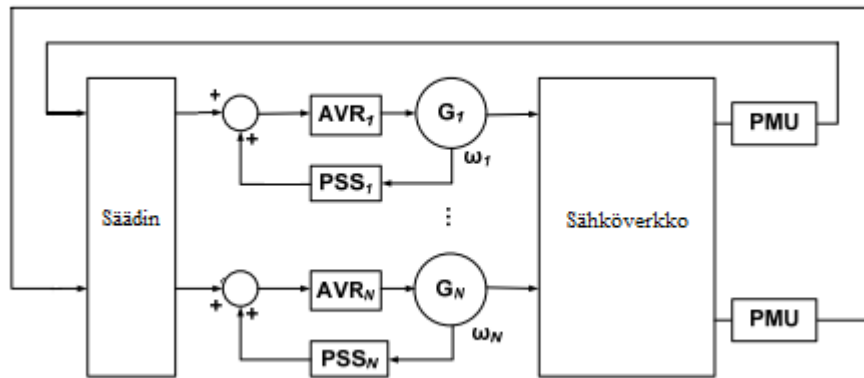
4.3 Säätorakenteet

Kirjallisuudessa on esitetty WAMS-järjestelmää hyödyntävien säädinten suunnitteluun useita eri menetelmiä. Kaikkia näitä säätimiä kutsutaan usein yhteisellä nimellä Wide-Area Control System (WACS). Täysin keskitetyssä säätorakenteessa kaikkien generaattoreiden ohjaussignaalit tulevat suoraan yksittäisestä keskitetystä säätimestä, jonka mittaussignaalit kerätään PMU-laitteiden avulla. Keskitetyn säätorakenteen ongelmana on, että se ei sisällä paikallisia PSS-säätimiä, jotka ovat keskeinen osa kaikkia todellisia sähkönsiirtojärjestelmiä. Tämän seurauksena täysin keskitetyn säätorakenteen käyttäminen ei ole realistista ja se olisi erittäin altis vioille ja signaalien menettämiselle. Keskitetty säätorakenne on esitetty kuvassa 4.2. (Wu et al., 2004).

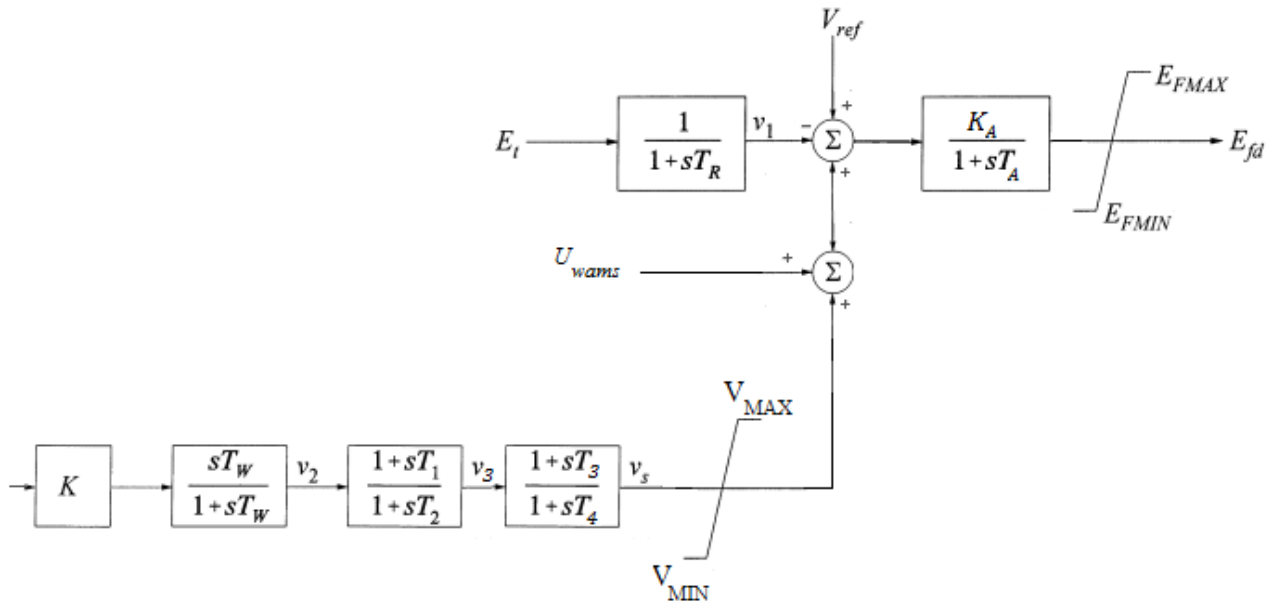
Tässä työssä käytettävä säätorakenne on kuvan 4.3 mukainen hierarkkinen rakenne. Siinä keskitetty säädin tuottaa ohjaussignaalin, joka lisätään paikallisten PSS-säädinten tuottamiin ohjauksiin generaattoreiden automaattisille jännitteensäätäjille. Kuvassa 4.4 on esitetty keskitetyn säätimen ohjaussignaalien yhdistäminen yksittäisen generaattorin jännitteensäätäjälle, jota ohjaa myös paikallinen PSS-säädin. WAMS-pohjaisella LQR-säätimellä pyritään siis parantamaan PSS-säädinten suorituskykyä etenkin alueiden välisten heilahtelujen vaimentamisessa. PSS-säädinten tehtävänä on säilyttää järjestelmän paikalliset moodit stabiileina, kun keskitetyn säätimen avulla vaimennetaan alueiden välisiä moodeja. Kaksitasoinen rakenne on myös täysin keskitettyä säädintä luotettavampi, sillä PSS-säätimet pyrkivät säilyttämään järjestelmän stabiilina vaikka keskitetty säädin lakkaisi toimimasta.



Kuva 4.2. Täysin keskitetty WAMS-säätörakenne. Generaattoreiden jännitteensäätäjien ohjaussignaalia tuotetaan pelkästään keskitetyllä säätimellä käyttäen WAMS-järjestelmällä tehtyjä mittauksia.



Kuva 4.3. Hierarkkinen WAMS-säätörakenne. Generaattoreiden ohjaussignaali on summa keskitetyn ja paikallisen säätimen tuottamista ohajuksista.



Kuva 4.4. Yksittäisen generaattorin automaattinen jännitteensäätäjä, PSS-säädin ja keskitetyn säätimen ohjaussignaali U_{wams} . Muokattu (Kundur, 1994, s. 815).

4.4 Viiveet

PMU-mittalaitteiden mittaussignaaleissa on viivettä, koska mittalaitteet saattavat sijaita maantieteellisesti varsin kaukana datan tallennuskeskuksesta. Kirjallisuudessa on esitetty hyvin paljon erilaisia viiveitä eri WAMS-projektien yhteydessä. Viiveet vaihtelevat noin 25 ms ja 250 ms välillä riippuen käytetystä tiedonsiirtotavasta. Viiveistä pienimmät saavutetaan valokuitukaapeleiden avulla ja suurimmat käytettäessä satelliittipohjaista viestintää (Stahlhut et al., 2008).

Viiveiden oikeanlainen mallintaminen on säätösovelluksissa erittäin tärkeää, koska todellisissa WAMS-järjestelmissä säädettävät generaattorit sijaitsevat vaihtelevilla etäisyyksillä keskitetystä säätimestä ja viiveet voivat vaihdella suuresti jolloin niiden vaikutus järjestelmän toimintaan on merkittävä. Täten keskitettyjen säätöalgoritmien tapauksessa on tärkeää demonstroida säätöalgoritmien toimintaa mahdollisimman laajalla viivealueella, jotta niiden soveltaminen todellisten sähkönsiirtojärjestelmien säädössä olisi mahdollista. Tässä työssä kaikki mittaus- ja ohjaussignaalit mallinnetaan kuitenkin viiveettöminä.

5 Keskitetyt säätöalgoritmit

Tässä työssä käytettävät keskitetyt säätimet perustuvat LQR-säätöalgoritmiin (Linear Quadratic Regulator). Ensin käydään läpi LQR-säädinten suunnitteluun liittyvä teoria. Tämän jälkeen kuvataan LQR-säätöön keskeisesti liittyvän tilaestimaattorin muodostaminen käyttäen Kalman-suodinta.

5.1 LQR-säädin

LQR on yksi optimisäädön keskeisimmistä osa-alueista. LQR-säädin pyrkii ajamaan järjestelmän tilan takaisin origoon häiriön jälkeen siten, että minimoidaan neliöllistä kustannusfunktiota (5.2), jonka arvo riippuu järjestelmän tilojen poikkeamista sekä käytetyistä ohjauksista tietyn ajanjakson sisällä. LQR-säätöalgoritmi siis yrittää minimoida virheen eli tilojen poikkeaman tasapainotilan arvoista käyttäen kuitenkin mahdollisimman vähän ohjauksia. LQR-säätimen keskeisimpiä etuja on sen joustavuus, koska kustannusfunktion painokertoimet virheille ja ohjauksille voidaan määrittää tapauskohtaisesti halutulla tavalla.

Tarkastellaan jatkuva-aikaista lineaarista prosessia, jota kuvaa seuraava lineaarinen tilaesitys.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (5.1)$$

Määritellään prosessille neliöllinen kustannusfunktio seuraavasti.

$$J = \frac{1}{2} \int_0^\infty (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (5.2)$$

Yhtälössä matriisit Q ja R kuvaavat kuinka paljon järjestelmän eri tilojen poikkeamat tai käytetyt ohjaukset kasvattavat kustannusfunktiota. Matriiseista Q on positiivisesti definiitti ja R positiivisesti semidefiniitti (Kirk 2004). Hyvin usein sekä Q että R ovat diagonaalisia, eli tilojen poikkeamat ja ohjaukset kasvattavat kustannusfunktion arvoa itsenäisesti ilman ristikkäisvaikutuksia useiden tilojen tai ohjausten välillä. Valittaessa R -ja Q -matriisien elementtien arvoja niiden absoluuttisten arvojen sijaan merkitsevää on ainoastaan arvojen välinen suhde. Näin ollen LQR-säätimet voidaan muodostaa pitämällä matriisi R vakiona ja varioimalla pelkästään matriisin Q arvoja.

Muodostettaessa LQR-säädintä on tarkasteltavan järjestelmän oltava stabiloitava. Kummatkin tässä työssä tarkasteltavan sähkönsiirtojärjestelmän tilaesityksen ovat ei-ohjattavia, mutta kuitenkin stabiloitavia. LQR-säädin muodostetaan ratkaisemalla järjestelmälle tilatakaisinkytkentä (5.3), joka minimoi kustannusfunktion (5.2) arvon. Säädetyssä järjestelmässä ohjaussignaali muodostetaan takaisinkytkennän avulla seuraavasti.

$$u = -Kx \quad (5.3)$$

Takaisinkytkentä K on määritelty

$$K = R^{-1} B^T P. \quad (5.4)$$

Matriisi $P = P^T$ on positiivisesti semidefiniitti matriisi, joka ratkaisee seuraavan algebrallisen Riccattin yhtälön.

$$A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + Q = 0 \quad (5.5)$$

Kirjoittamalla alkuperäisen lineaarisen tilaesityksen yhtälö (5.1) siten, että ohjaussignaali on korvattu tilatakaisinkytkennällä (5.3) saadaan muodostettua säädetyn järjestelmän systeemimatriisi (5.6) mukaisesti. Systeemimatriisin ominaisarvojen avulla voidaan tarkastella säädetyn järjestelmän käyttäytymistä sen toimintapisteen ympäristössä.

$$\dot{x} = (A - BK)x \quad (5.6)$$

5.2 Tilaestimointi

Kohdan 5.1 tarkastelussa kaikkien järjestelmän tilamuuttujien oletetaan olevan mitattavissa tilatakaisinkytkentää (5.3) varten. Tämä ei ole kuitenkaan realistista hyvin monimutkaisten sähkönsiirtojärjestelmien tapauksessa, joissa esimerkiksi PSS-säädinten tilaa kuvaavat muuttujat eivät ole mitattavissa. Tätä varten takaisinkytkennässä on käytettävä tilaestimaattorilla estimoituja tilamuuttujia \hat{x} todellisten järjestelmän tilojen x sijaan. Takaisinkytkentälaki (5.3) on tällöin muotoa

$$u = -K\hat{x} \quad (5.7)$$

Yleinen käytettävä tilaestimaattori on Kalman-suodin. Kalman-suotimen ja LQR-säätimen yhdistelmää kutsutaan LQG-säätimeksi (Liner Quadratic Gaussian). Sitä käytetään usein sellaisten järjestelmien yhteydessä, joissa prosessi ja mittaussignaalit sisältävät valkoisen kohinan muodossa olevia häiriöitä. Kalman-suotimen suunnittelussa käytettävää menetelmää voidaan käyttää myös täysin deterministisille järjestelmille. Suotimen muodostamista varten tarkasteltavan järjestelmän on oltava kohdan 2.5 mukaisesti havaittava. Tarkasteltavat kaksi sähkönsiirtojärjestelmän mallia ovat kummatkin ei-tarkkailtavia, mutta kuitenkin havaittavia, ja niille voidaan muodostaa Kalman-suotimet. Kalman-suotimen toimintaa kuvaa seuraava differentiaaliyhtälö.

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - C\hat{x}) \quad (5.8)$$

Yhtälössä L on vakioarvoinen estimointivirhettä kuvaava matriisi. Optimaalinen L minimoi estimaatin virheen odotusarvon $E\{[x - \hat{x}]^T[x - \hat{x}]\}$. Se ratkaistaan minimoimalla kustannusfunktio (5.9).

$$J_L = \int_0^\infty (x^T W x + u^T V u) dt \quad (5.9)$$

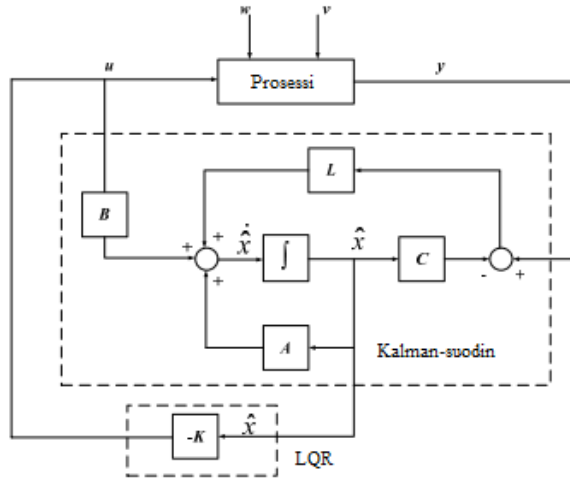
Funktiossa W ja V ovat prosessi- ja mittauskohinan kovarianssimatriisit. Matriisit ovat Kalman-suotimen viritysparametrit. Funktion (5.9) minimoiva matriisi L ratkaistaan seuraavan yhtälön mukaisesti.

$$L = \Sigma C^T V^{-1} \quad (5.10)$$

Yhtälössä esiintyvä $\Sigma = \Sigma^T$ on positiivisesti definiitti matriisi, joka ratkaisee algebrallisen Riccatin yhtälön.

$$\Sigma A^T + A \Sigma - \Sigma C^T V^{-1} C \Sigma + W = 0 \quad (5.11)$$

Kalman-suotimen ja LQR-säätimen yhdistäminen LQG-säätimeksi on esitetty kuvassa 5.1.



Kuva 5.1. Kalman-suodin ja LQR-säädin yhdistettynä LQG-säätimeksi. Muokattu (Skogestad et al., 1996)

Kalman suotimen tuottaman tilaestimaatin virhe $e = \hat{x} - x$ toteuttaa yhtälön

$$\dot{e} = (A - LC)e. \quad (5.12)$$

Matriisi $A - LC$ kuvaa estimaattorin dynamiikan. LQR-säätimestä ja Kalman-suotimesta koostuvan järjestelmän tilaesitys voidaan esittää seuraavasti.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A - BK & BK \\ 0 & A - LC \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ e \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

Yhtälöstä (5.13) nähdään että estimaattorin ja säädetyn järjestelmän dynamiikka ovat erillisiä toisistaan. Järjestelmän ominaisarvot ovat täten unioni säädetyn järjestelmän $A - BK$ ja estimaattorin $A - LC$ ominaisarvoista (Skogestad et al., 1996). Sekä LQR-säätimellä että Kalman-suotimella on itsessään hyvät robustisuusominaisuudet, mutta yhdistettäessä nämä menetetään (Doyle 1978).

Tässä työssä ei tarkastella Kalman-suotimen ja LQG-säädinten teoriaa laajemmin. Todellisissa sähkönsiirtojärjestelmissä WAMS-järjestelmällä mittattavia suureita hyödynnetään tilaestimoinnissa suoran takaisinkytkennän sijaan. Kalman-suotimen toimintaa ja erilaisia sovelluksia on kuvattu tarkemmin useissa teoksissa kuten esimerkiksi (Chui et al., 2008) ja (Bar-Shalom et al., 2001). LQG-säädinten teoriaa on käsitelty laajemmin muun muassa (Anderson et al., 1989).

6 Tulokset

Tässä luvussa tarkastellaan keskitettyjen LQR-säädinten tehokkuutta kahden tutkittavan sähkönsiirtojärjestelmän mallin avulla. Ensimmäisenä kuvataan säädettävien generaattoreiden ja tilaestimointiin käytettävien mittausten valitseminen. Tämän jälkeen muodostettujen säädinten tehokkuutta tarkastellaan käyttämällä lineaarista analyysiä ja epälineaarisia aikatazon simulaatioita.

6.1 Ohjattavien generaattoreiden ja mittaussignaalien valitseminen

Seuraavassa kuvataan keskitetyllä LQR-säätimellä ohjattavien generaattoreiden sekä tilaestimoinnissa käytettävien mittaussignaalien valitseminen tarkasteltavissa sähkönsiirtojärjestelmien malleissa. Todellisissa järjestelmissä säätimien asentamiseen ja niiden vaatimaan infrastruktuuriin liittyvät kustannukset halutaan pitää mahdollisimman pieninä siten, että saavutetaan kuitenkin riittävä suorituskky. Näin ollen säädettäväksi generaattoreiksi on kannattavaa valita ainoastaan sellaisia generaattoreita, joita ohjaamalla pystytään vaimentamaan tehokkaasti haluttuja alueiden välisiä moodeja.

Säädettävien generaattoreiden valitseminen tehdään kahdella tapaa. Käytettävät valintaperusteet ovat osallistumiskertoimet ja ohjattavuudet alueiden väliselle moodille. Taulukossa 6.1 on esitetty neljän generaattorin järjestelmän generaattoreiden nopeuksien osallistumiskertoimet ja ohjattavuudet magnetointijärjestelmän ohjausjännitteen avulla. Säädettäväksi generaattoreiksi valitaan ne generaattorit, joilla arvot ovat suurimpia, koska näiden generaattoreiden nopeusheilauksen vaimentamisen tai ohjauksen vaikutus alueiden väliseen moodiin on suurin.

Taulukosta nähdään, että suurin osallistumiskerroin on generaattorilla 3. Moodin ohjattavuus on suurin generaattorissa 2, jossa osallistumiskerroin on pienin. Huomataan myös, että generaattoreiden osallistumiskertoimissa on suurempaa vaihtelua kuin ohjattavuuksissa, jotka ovat kaikilla generaattoreilla varsin lähellä toisiaan. Käytettävät LQR-säätimet suunnitellaan neljän generaattorin järjestelmän mallin tapauksessa kolmella tavalla. Ensimmäisessä konfiguraatiossa LQR-säätimellä ohjataan pelkästään suurimman osallistumiskertoimen generaattoria 3. Toisessa tapauksessa säädetään suurimman ohjattavuuden generaattoria 2. Viimeisenä säädin suunnitellaan ohjaamaan kaikkia generaattoreita.

Taulukko 6.1. Alueiden välisen moodin osallistumiskertoimet generaattoreiden nopeuksille ja ohjattavuudet neljän generaattorin järjestelmän mallissa.

Gen	Osallistumiskerroin	Normalisoitu	Ohjattavuus	Normalisoitu
1	0,1272	0,81	11,3027	0,89
2	0,0755	0,48	12,6637	1,00
3	0,1579	1,00	10,9913	0,87
4	0,1190	0,75	12,3653	0,98

Uuden-Englannin ja New Yorkin järjestelmän mallille useita keskitettyjä LQR-säätimiä. Käytetyillä säätimillä ohjataan yhtä, neljää tai 12:tä alueiden 1 ja 2 generaattoreista 1–12. Alueen 2 generaattori 13 jätetään huomioimatta ohjattavia generaattoreita valittaessa, koska sille ei ole mallinnettu PSS-säädintä. Osallistumiskertoimet ja moodin ohjattavuudet on esitetty taulukossa 6.2.

Sekä yhden että neljän generaattorin säätökonfiguraatioissa säädettävien generaattoreiden valinta tehdään sekä osallistumiskerrointen että alueiden välisen moodin ohjattavuuden perusteella. Tällä tavoin pystytään tutkimaan, kuinka voimakkaasti generaattoreiden valitseminen vaikuttaa saavutettavaan vaimennukseen, kun säädettävien generaattoreiden lukumäärä pidetään samana. Säädettävistä generaattoreista suurin osallistumiskerroin on generaattorilla 6 ja suurin ohjattavuus generaattorilla 12. Nähdään myös, että generaattoreiden 1–12 viidenneksi suurin osallistumiskerroin on selvästi pienempi kuin neljä suurinta arvoa. Täten viidennen generaattorin lisääminen säädettävien generaattoreiden joukkoon ei välttämättä parantaisi merkittävästi säätimen suorituskykyä moodin vaimentamisessa. Osallistumiskerrointen perusteella säädettäviksi generaattoreiksi valitaan siis generaattorit 4–7. Vastaavasti ohjattavuuden perusteella valittavat neljä generaattoria ovat 4, 6, 9 ja 12. Kaikki käytettävät säätökonfiguraatiot ovat kuvattu taulukossa 6.3.

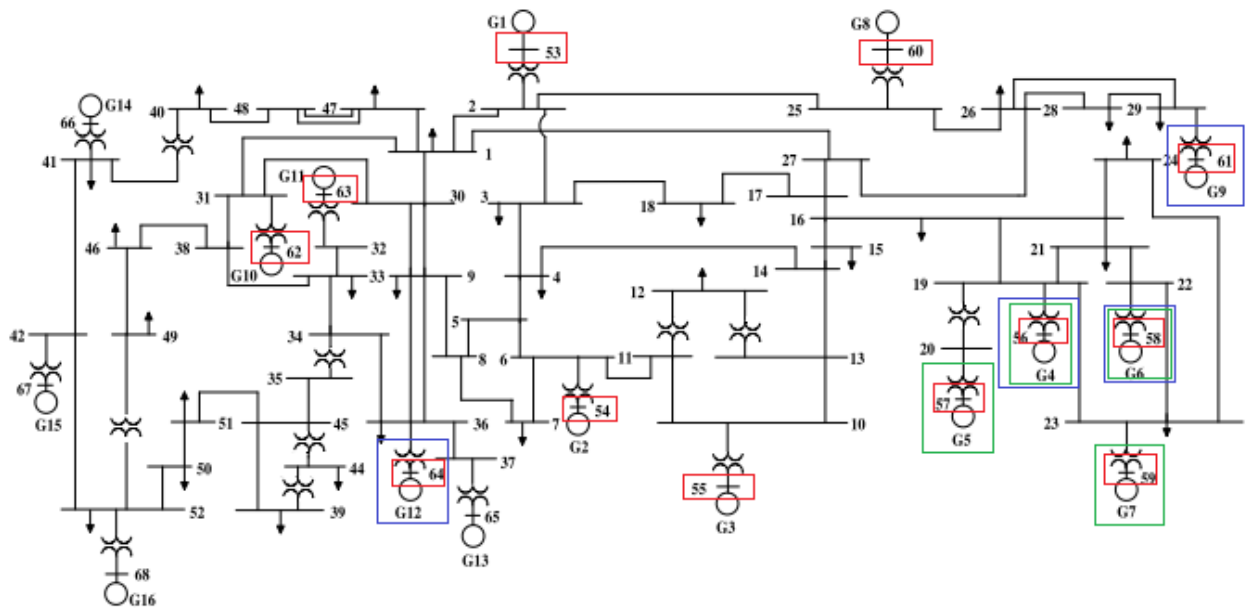
Taulukko 6.2. Alueiden 1 ja 2 välisen moodin osallistumiskertoimet generaattoreiden nopeuksille ja ohjattavuudet Uuden-Englannin ja New Yorkin sähkönsiirtojärjestelmän mallissa.

Gen	Osallistumiskerroin	Normalisoitu	Ohjattavuus	Normalisoitu
1	0,0029	0,0468	0,5919	0,2101
2	0,0133	0,2145	1,4074	0,4996
3	0,0166	0,2677	1,7833	0,6331
4	0,0369	0,5952	2,7036	0,9598
5	0,0514	0,8290	2,5756	0,9143
6	0,0620	1,0000	2,7666	0,9821
7	0,0429	0,6919	2,1647	0,7685
8	0,0117	0,1887	1,3217	0,4692
9	0,0314	0,5065	2,8020	0,9947
10	0,0001	0,0016	0,0967	0,0343
11	0,0014	0,0226	0,2226	0,0790
12	0,0252	0,4065	2,8169	1,0000

Taulukko 6.3. Uuden-Englannin ja New Yorkin sähkönsiirtojärjestelmän mallissa käytettävät keskitetyt säätökonfiguraatiot.

Säädettävät generaattorit	Valintaperuste
6	Suurin osallistumiskerroin
4, 5, 6, 7	Generaattorit, joilla suurimmat nopeuden osallistumiskertoimet
12	Suurin alueiden välisen moodin ohjattavuus
4, 6, 9, 12	Generaattorit, joilla suurimmat aluiden välisen moodin ohjattavuudet
1–12	Kaikki alueiden 1 ja 2 generaattorit

WAMS-järjestelmää hyödyntävässä keskitetyssä säätörakenteessa säätimen käyttämät mittaussignaalit saadaan PMU-mittalaitteilta. Tässä työssä mittaussignaaleina käytetään jännitteiden kulmia verkon eri solmuissa. Sähkönsiirtojärjestelmien LQR-säädön tutkimuksessa jännitteiden kulmat on havaittu toimiviksi mittaussignaaleiksi tilaestimointiin (Almutairi et al., 2009). Todellisissa järjestelmissä käytettävien mittalaitteiden määrä halutaan minimoida kustannusten kuitenkin siten, että mittausten avulla saavutetaan riittävä kattavuus järjestelmän tilaestimointia varten. Tässä työssä keskitytään kuitenkin LQR-säätöalgoritmin soveltamiseen sähkönsiirtojärjestelmissä, ja mittalaitteiden sijoittamisen ei katsota kuuluvan työn keskeisimpiin aiheisiin. Neljän generaattorin järjestelmän mallissa mittalaitteiden oletetaan sijaitsevan kaikissa verkon 13 solmussa. Järjestelmää pidetään testitapauksena, ja siinä halutaan enemmänkin demonstroida LQR-säätöalgoritmia kuin esittää todellisiin järjestelmiin sovellettava säätörakenne. Todellisissa järjestelmissä tämän tasoista mittausten kattavuutta ei ole realistista toteuttaa. Uuden-Englannin ja New Yorkin sähkönsiirtojärjestelmän mallissa mittaussignaaleina käytetään ainoastaan säädettävien generaattoreiden 1–12 solmujen jännitteiden kulmia, jolloin käytettävät mittausten määrä on rajoitetumpi. Ohjattavien generaattoreiden ja mittalaitteiden sijainnit Uuden-Englannin ja New Yorkin sähkönsiirtojärjestelmän mallissa on esitetty kuvassa 6.1.



Kuva 6.1. Säädetävien generaattoreiden ja mittalaitteiden sijainnit Uuden-Englannin ja New Yorkin sähkönsiirtojärjestelmän mallissa. Participation factor -arvojen perustella valitut generaattorit on merkitty vihreällä ja ohjattavuuden perusteella valitut generaattorit sinisellä. Mittalaitteiden sijainnit on merkitty punaisella. Muokattu (Hasanovic 2001, s. 20).

6.2 Neljän generaattorin järjestelmä

Neljän generaattorin sähkönsiirtojärjestelmän mallia tarkastellaan kolmessa erilaisessa kuormitustilanteessa. Kuormitus on kuvattu pätötehon tuotannon ja kulutuksen avulla. Sähkönsiirtojärjestelmien monimutkaisen luonteen takia pätö- ja loistehon tuotanto ja kulutus eivät skaalautu samalla tavalla, ja pätöteho on kuormitustilanteen kuvaamisen kannalta keskeisempi muuttuja. Kuormien kuluttama loisteho on skaalattava siten, että tehonjako konvergoituu ratkaisuun, jossa generaattoreiden loistehon tuotanto- tai kulutus on liitteessä A kuvattujen raja-arvojen sisällä.

100-prosenttisessä kuormituksessa verkon pätö- ja loistehon kulutus ja tuotanto vastaavat (Rogers, 2000) mukaisia arvoja, jotka on esitetty liitteessä A. Tätä järjestelmän toimintapistettä kutsutaan tästä eteenpäin sen normaaliksi kuormitukseksi. Kevyessä kuormituksessa sekä pätötehon tuotanto että kulutus ovat 60 % normaalista ja kuormien loisteho-osuudet ovat 150 % normaalista. Vastaavasti raskaassa kuormituksessa pätötehon tuotanto ja kulutus ovat 120 % normaaliin kuormitukseen nähden. Loistehon kulutus kuormissa on samalla 50 % normaalista.

6.2.1 Säättämättömän ja PSS-säädetyn järjestelmän lineaarinen analyysi

Järjestelmälle muodostettiin lineaarinen tilaesitys Matlabin Power System Toolbox – lisäosan (Rogers et al., 2008) avulla jokaisessa kuvatussa kuormitustilanteessa. Järjestelmän alueiden välinen moodi eri kuormitustilanteissa on kuvattu taulukoissa 6.4 ja 6.5 sekä säättämättömän että paikallisilla PSS-säätimillä säädetyn järjestelmän tapauksessa.

Taulukko 6.4. Säättämättömän järjestelmän alueiden välinen moodi eri kuormitustilanteissa.

Kuormitus (%)	Ominaisarvo	Taajuus (Hz)	ζ (%)
100	$0,0626 \pm 4,2394j$	0,6747	-1,48
60	$-0,2549 \pm 4,0438j$	0,6436	6,29
120	$0,1528 \pm 3,7653j$	0,5993	-4,05

Taulukko 6.5. Paikallisilla PSS-säätimillä säädetyn järjestelmän alueiden välinen moodi eri kuormituksissa.

Kuormitus (%)	Ominaisarvo	Taajuus (Hz)	ζ (%)
100	$-0,5523 \pm 4,0124j$	0,6386	13,64
60	$-0,6579 \pm 3,9078j$	0,6220	16,60
120	$-0,4574 \pm 3,5558j$	0,5659	12,76

PSS-säätimillä säädetyn järjestelmän alueiden välinen moodi on stabiili kaikissa kolmessa kuormitustilanteessa. Tulosten perusteella kuormituksen muuttaminen muuttaa alueiden välisen moodin vaimennussuhdetta. Kuormituksen keventäminen kasvattaa vaimennusta. Vastaavasti raskaammassa kuormituksessa vaimennus on vähäisempi.

6.2.2 LQR-säätetyn järjestelmän lineaarinen analyysi

LQR-säätimen tilatakaisinkytkentä \mathbf{K} muodostetaan kohdan 5.1 mukaisesti minimoimalla kustannusfunktioita (5.2). Kaikki käytettävät säätimet muodostetaan käyttämällä normaalissa kuormitustilanteessa muodostettua lineaarista tilaesitystä. Muille kuormitustilanteille ei muodosteta erillisiä LQR-säätimiä vaan niiden tarkastelussa käytetään samaa säädintä. Tällä tavoin pyritään tarkastelemaan säätimen robustisuutta järjestelmän toimintapisteen muutoksille.

LQR-säätimen muodostamisessa käytetty ohjausten painomatriisi \mathbf{R} on identiteettimatriisi, jonka koko määräytyy LQR-säätimellä ohjattavien generaattoreiden lukumäärän perusteella. Tilamuuttujien painomatriisi \mathbf{Q} on diagonaalinen 56×56 matriisi, jonka diagonaalilla olevat alkiot q_i vastaavat tilamuuttujia x_i . Osallistumiskerrointen perusteella tehoheilahtelujen kannalta merkittäviä tiloja ovat ainoastaan roottorikulmat ja kulmanopeudet. Takaisinkytkentää \mathbf{K} muodostettaessa asetetaan nollasta poikkeaviksi ainoastaan säädettävien generaattoreiden roottorikulmia ja kulmanopeuksia vastaavat \mathbf{Q} -matriisin diagonaalelementit $q_{\delta i}$ ja $q_{\omega i}$, koska generaattoreiden muiden tilamuuttujien muutokset eivät vaikuta merkittävästi järjestelmässä alueiden väliseen moodiin. Koska LQR-säätimen ohjaussignaalit vaikuttavat suoraan ainoastaan sillä säädettäviin generaattoreihin, säätimellä ei pyritä vaikuttamaan muiden generaattoreiden roottorikulmiin ja kulmanopeuksiin. Näin ollen näitä tilamuuttujia vastaavat \mathbf{Q} :n alkiot ovat nollia.

LQR-säätimet muodostetaan kohdassa 6.1 kuvatuille kolmelle eri säätökonfiguraatiolle. Jokaisessa tapauksessa LQR-säädin muodostetaan kolmella eri painomatriisin \mathbf{Q} alkioiden

arvoilla: 1,0, 0,5 ja 0,1. Säädetyn järjestelmän tarkastelua varten jokaiselle eri kuormitustilanteelle muodostetaan lineaarinen tilaesitys käyttäen Matlabin Power System Toolbox –lisäosaa (Rogers et al., 2008). Taulukoissa 6.6–6.8 on esitetty säädetyn järjestelmän systeemimatriisista $A-BK$ ratkaistut alueiden välisen moodin ominaisarvot, taajuuudet ja vaimennussuhteet ζ prosentteina eri painomatriisin Q arvoilla kaikissa kolmessa kuormitustilanteessa.

Taulukoissa esitetyistä tuloksista nähdään, että kaikissa tapauksissa LQR-säädetyssä järjestelmässä vaimennus on suurempi kuin järjestelmässä, jossa generaattoreita ohjataan ainoastaan PSS-säätimillä. Säädettyä ainoastaan yhtä generaattoria, suurin vaimennus saavutetaan ohjaamalla generaattoria 3. Kaikissa tapauksissa saavutettava vaimennus on suurempi tai lähes yhtä suuri kuin säädettyä generaattoria 2. Suurimmat erot vaimennussuhteissa saavutetaan raskaassa kuormituksessa. Generaattoria 3 säätämällä saavutettava vaimennussuhde voi tällöin olla lähes kaksinkertainen verrattuna generaattorin 2 säätämiseen samoilla painokertoimilla muodostetulla säätimellä. Vastaavasti vaimennussuhteet ovat lähimpänä toisiaan kevyessä kuormituksessa. Lisäksi nähdään, että säädettyä ainoastaan yhtä generaattoria paras vaimennussuhde saavutetaan raskaassa kuormituksessa painokertoimilla 1,0, vaikka säädin on suunniteltu normaalia kuormitusta kuvaavan tilaesityksen avulla.

Suurimmat vaimennussuhteet saavutetaan ohjaamalla LQR-säätimellä kaikkia neljää generaattoria. Tällöin kaikissa kuormituksissa heikoin saavutettu vaimennus on suurempi kuin suurin yksittäistä generaattoria säätämällä saavutettu vaimennus. Tällä säätökonfiguraatiolla saavutettu heikoin vaimennus on noin 30 %, joka saavutetaan kevyessä kuormituksessa painokertoimien ollessa 0,1. Suurin vaimennus saavutetaan raskaassa kuormituksessa painokertoimilla 1,0. Suurimmillaan vaimennussuhteet ovat yli kaksinkertaisia verrattuna yksittäisiä generaattoreita säätämällä saavutettuihin arvoihin.

Tulosten perusteella voidaan päätellä, että LQR-säädin kasvattaa vaimennusta. Säädettyä useita generaattoreita LQR-säätimen painokertoimilla on suurempia vaikutus alueiden välisen moodin ominaisuuksiin kuin säädettyä ainoastaan yksittäisiä generaattoreita. Ohjattaessa yksittäistä generaattoria moodin taajuus pysyy lähes samana ja ainoastaan vaimennussuhde muuttuu käytettävän LQR-säätimen viritysparametreja muutettaessa. Säädettyä kaikkia generaattoreita alueiden välisen moodin taajuus vaihtelee riippuen säädintä muodostettaessa käytetyistä parametreista. Havaittiin myös, että kaikissa tapauksissa systeemimatriisin kaikki ominaisarvot olivat kompleksitason vasemmassa puolitasossa, eli säädetty järjestelmä oli stabiili.

Taulukko 6.6. LQR-säädetyin järjestelmän $A-BK$ alueiden välinen moodi normaalissa kuormituksessa.

Säädettävät generaattorit	Painot $[q_{\delta i} \ q_{\omega i}]$	Ominaisarvo	Taajuus (Hz)	ζ (%)
2	1,0	$-0,9608 \pm 4,2309j$	0,6734	22,15
2	0,5	$-0,9099 \pm 4,1834j$	0,6658	21,25
2	0,1	$-0,7257 \pm 4,0709j$	0,6479	17,55
3	1,0	$-1,2903 \pm 4,0186j$	0,6396	30,57
3	0,5	$-1,1785 \pm 4,0077j$	0,6378	28,21
3	0,1	$-0,8473 \pm 4,0020j$	0,6369	20,71
1, 2, 3, 4	1,0	$-4,3617 \pm 5,2086j$	0,8290	64,20
1, 2, 3, 4	0,5	$-3,3786 \pm 4,8054j$	0,7648	57,52
1, 2, 3, 4	0,1	$-1,7805 \pm 4,2526j$	0,6768	38,62

Taulukko 6.7. LQR-säädetyin järjestelmän $A-BK$ alueiden välinen moodi kevyessä kuormituksessa.

Säädettävät generaattorit	Painot $[q_{\delta i} \ q_{\omega i}]$	Ominaisarvo	Taajuus (Hz)	ζ (%)
2	1,0	$-0,9518 \pm 4,1298j$	0,6573	22,46
2	0,5	$-0,9150 \pm 4,0879j$	0,6506	21,84
2	0,1	$-0,7990 \pm 3,9798j$	0,6334	19,68
3	1,0	$-1,0597 \pm 4,0806j$	0,6494	25,14
3	0,5	$-0,9877 \pm 4,0497j$	0,6445	23,69
3	0,1	$-0,7947 \pm 3,9692j$	0,6317	19,63
1, 2, 3, 4	1,0	$-2,5418 \pm 5,2417j$	0,8342	43,63
1, 2, 3, 4	0,5	$-2,1105 \pm 4,8090j$	0,7654	40,19
1, 2, 3, 4	0,1	$-1,3307 \pm 4,2011j$	0,6686	30,20

Taulukko 6.8. LQR-säädetyin järjestelmän $A-BK$ alueiden välinen moodi raskaassa kuormituksessa.

Säädettävät generaattorit	Painot $[q_{\delta i} \ q_{\omega i}]$	Ominaisarvo	Taajuus (Hz)	ζ (%)
2	1,0	$-0,7837 \pm 3,6571j$	0,5820	20,96
2	0,5	$-0,6720 \pm 3,6121j$	0,5749	18,29
2	0,1	$-0,4067 \pm 3,5744j$	0,5689	12,78
3	1,0	$-1,4219 \pm 3,6942j$	0,5879	35,92
3	0,5	$-1,2867 \pm 3,6142j$	0,5752	33,54
3	0,1	$-0,8806 \pm 3,5306j$	0,5619	24,20
1, 2, 3, 4	1,0	$-4,5156 \pm 4,4956j$	0,7155	70,87
1, 2, 3, 4	0,5	$-3,4973 \pm 4,1690j$	0,6635	64,27
1, 2, 3, 4	0,1	$-1,7813 \pm 3,7135j$	0,5910	43,25

6.2.3 Epälineaariset simuloinnit

Tässä kohdassa tarkastellaan säädetyin järjestelmän käyttäytymistä kolmen erilaisen häiriön jälkeen epälineaaristen aikatazon simulaatioiden avulla. Kaikki häiriöt

simuloidaan kohdassa 6.1 kuvatuissa kolmessa kuormitustilanteessa. Tarkasteltavat häiriöt ovat

- 100 ms pituinen oikosulku solmussa 3 ajanhetkellä 100 ms,
- 100 ms pituinen oikosulku solmussa 3 ja toisen solmujen 3 ja 101 välisen johdon menettäminen oikosulun jälkeen,
- Toisen solmujen 3 ja 101 välisen johdon menettäminen ajanhetkellä 100 ms.

Simuloinnit tehdään käyttäen Matlabin Power System Toolbox –lisäosaa (Rogers et al., 2008). Kaikki simulaatioissa käytettävät LQR-säätimet on muodostettu matriisin Q alkioden arvoilla 0,1. Simulaatiotulosten kuvaajissa teho on esitetty suhteellisen arvona eli suhteena järjestelmän tehon perusarvoon 100 MW.

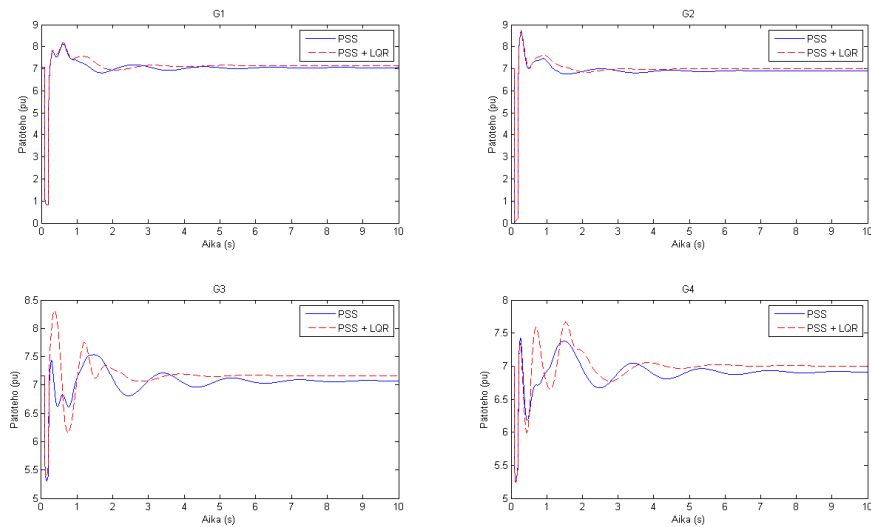
Simulaatioita varten järjestelmälle muodostettiin tilaestimaattori Kalman-suotimena kohdan 5.2 mukaisesti. Tilaestimaattori muodostettiin käyttämällä järjestelmän normaalin kuormitustilanteen ympärillä muodostettua lineaarista tilaesitystä. Sen muodostamisessa käytetään seuraavia kokeilemalla saatuja arvoja viritysparametreina toimiville matriiseille W ja V .

$$W = 10^{-1} \times I, V = 10^{-3} \times I$$

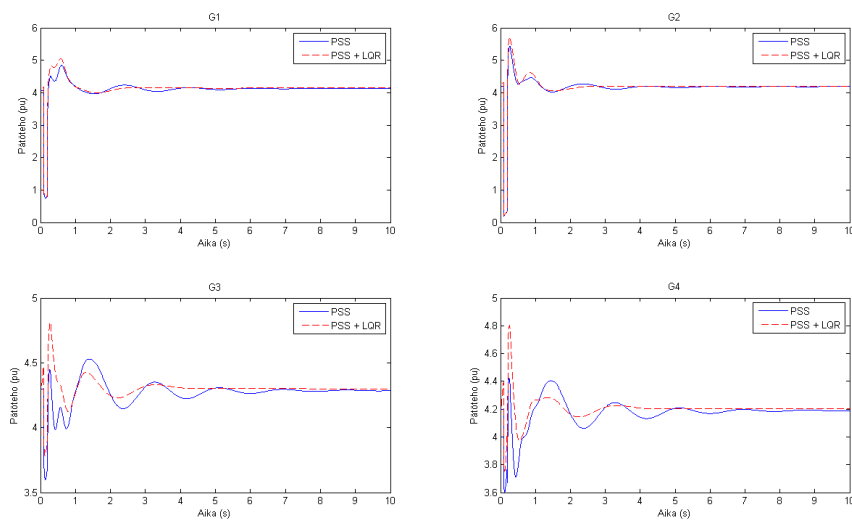
Generaattoreiden tuottamat pätötehot oikosulun ja johdon menettämisen jälkeen eri kuormituksissa on esitetty kuvissa 6.2–6.6. Muut tulokset ovat esitetty työn liitteessä D. Kuvasta 3 nähdään, että säädettäessä ainoastaan generaattoria 3 oikosulun seurauksena generaattoreiden 1 ja 2 tuottama teho käyttäytyy lähes samalla tavalla kuin ilman LQR-säädintä. Generaattorin 3 tehoheilahtelut on kuitenkin vaimennettu selvästi tehokkaammin. LQR-säädin kasvattaa myös hieman generaattorin 4 tehoheilahtelujen vaimennusta. Generaattoreiden tuottamat pätötehot, kun LQR-säätimellä ohjataan kaikkia generaattoreita, ovat kuvassa 6.3. Havaitaan, että LQR-säädetyssä järjestelmässä kaikkien generaattoreiden tuottamat pätötehot asettuvat selvästi nopeammin lopullisiin arvoihinsa kuin käytettäessä pelkkiä PSS-säätimiä. Tehovasteiden ylitys ei ole merkittävästi suurempi kuin käytettäessä pelkkiä PSS-säätimiä tai ohjattaessa ainoastaan generaattoria 3 LQR-säätimellä.

Oikosulun ja johdon menettämisen jälkeen havaitaan, että generaattoria 3 ohjaavan LQR-säätimen vaikutus on heikompi kuin pelkän oikosulun jälkeen. Kaikkia generaattoreita ohjaava LQR-säädin vaimentaa kuitenkin tehoheilahtelut erittäin voimakkaasti. Tehovasteiden ylitykset ovat vian seurauksena selvästi suuremmat kuin pelkillä PSS-säätimillä säädetyssä järjestelmässä. Viimeinen simulaatioiden avulla tarkasteltu vika on toisen solmuja 3 ja 101 yhdistävän johdon menettäminen ilman oikosulkua. Tällöin tehot asettuvat nopeammin käytettäessä LQR-säädintä, mutta niiden loppuarvo poikkeaa pelkillä PSS-säätimillä säädetyssä järjestelmästä, koska säädin pyrkii ajamaan järjestelmän takaisin alkuperäisen kaikki johdot sisältävän järjestelmän tilan origoon.

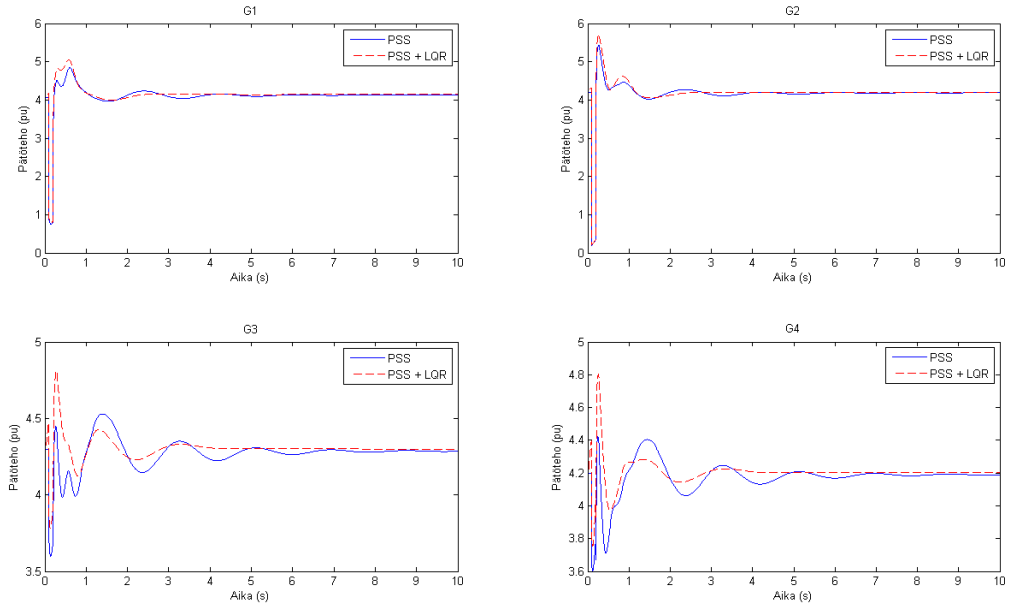
Kuvasta 6.4 nähdään, että kevyessä kuormituksessa tehtyjen simulointien kuvaajista voidaan havaita, että LQR-säädin vaimentaa tehoheilahtelut selvästi pelkkiä PSS-säätimiä voimakkaammin myös kyseisessä toimintapisteessä, vaikka säädin ja tilaestimaattori on muodostettu normaalin kuormituksen määrittämän toimintapisteen tilaesityksen perusteella. Viimeisenä neljän generaattorin järjestelmää simuloidaan raskaassa kuormituksessa. Kuvasta 6.5 nähdään, että pelkän oikosulun jälkeen LQR-säädin kasvatti tehoheilahtelujen vaimennusta. Simulaatioissa havaittiin kuitenkin, että LQR-säätetyn järjestelmän käyttäytyminen muuttui epästabiiliksi oikosulun ja johdon menettämisen sekä pelkän johdon menettämisen jälkeen säädettäessä sekä yhtä että neljää generaattoria kuvan 6.6 mukaisesti.



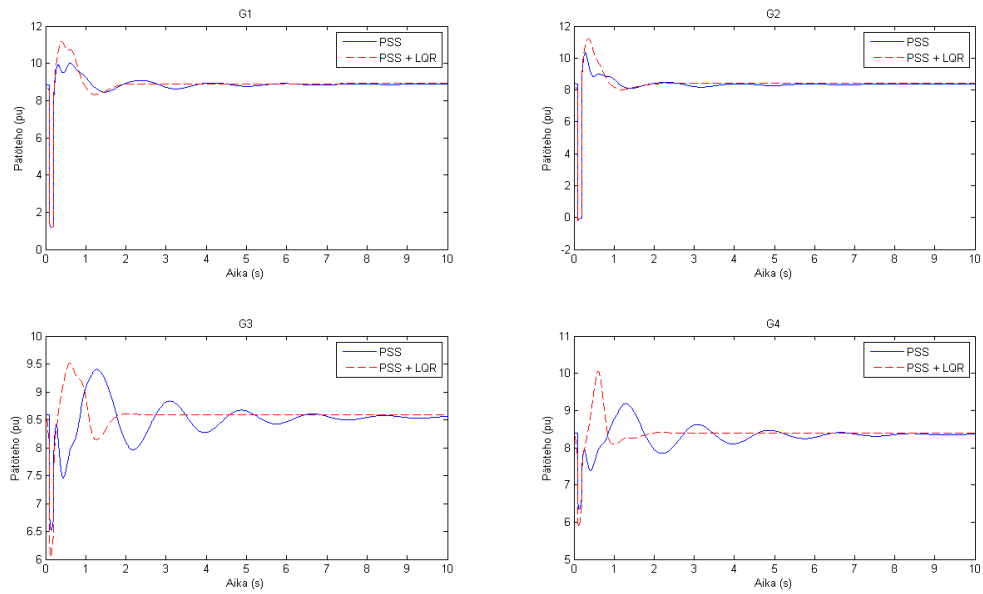
Kuva 6.2. Generaattoreiden tuottama pätöteho oikosulun ja johdon menettämisen seurauksena normaalissa kuormituksessa. Säädettävä generaattori: 3.



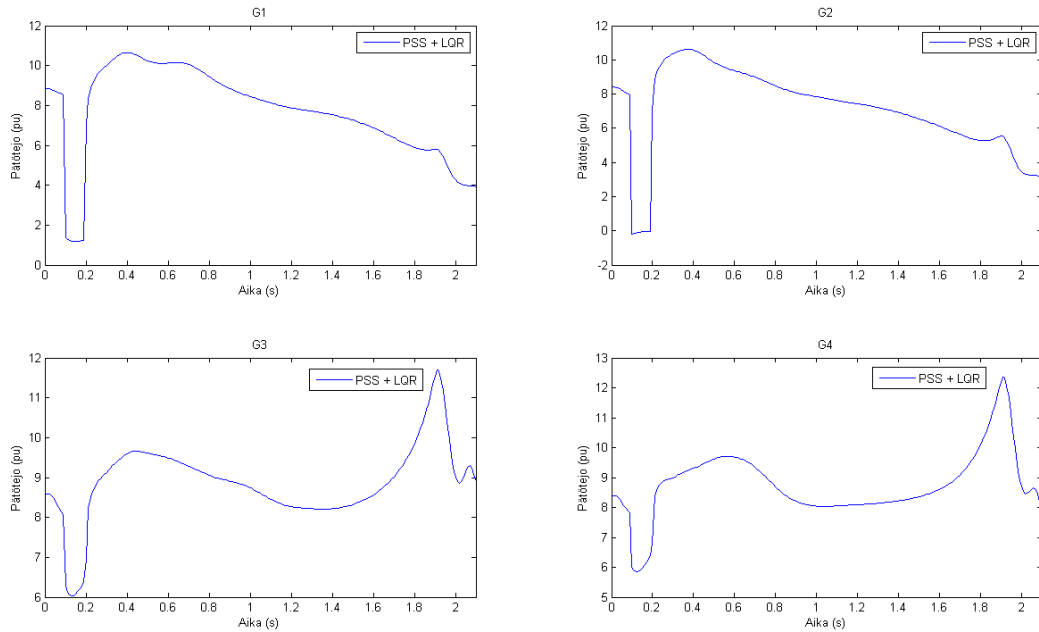
Kuva 6.3. Generaattoreiden tuottama pätöteho oikosulun ja johdon menettämisen seurauksena normaalissa kuormituksessa. Säädettävät generaattorit: 1–4.



Kuva 6.4. Generaattoreiden tuottama pätöteho oikosulun ja johdon menettämisen seurauksena kevyessä kuormituksessa. Säädetävät generaattorit: 1–4.

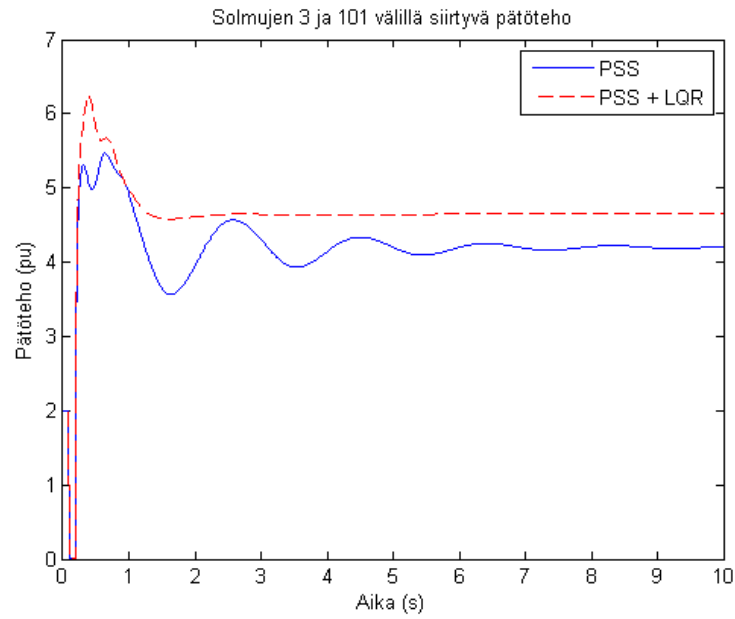


Kuva 6.5. Generaattoreiden tuottama pätöteho oikosulun seurauksena raskaassa kuormituksessa. Säädetävät generaattorit: 1–4.

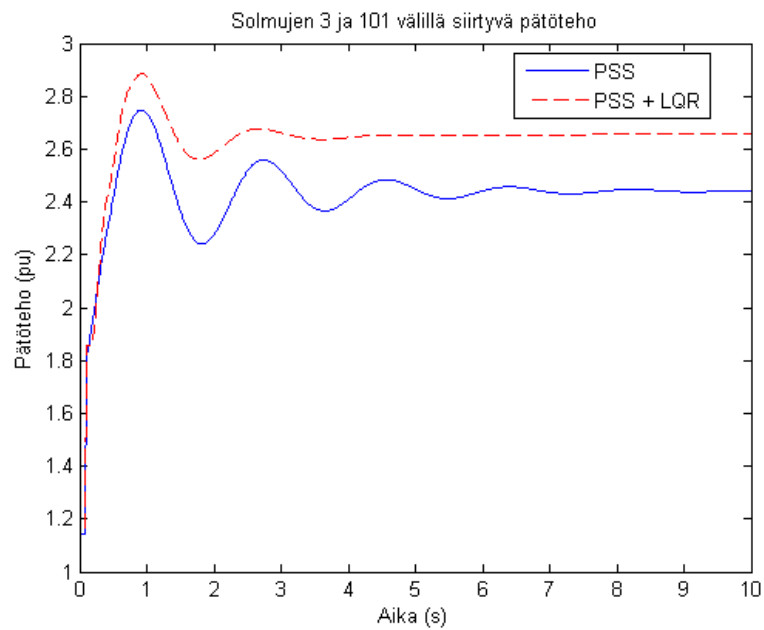


Kuva 6.6. Generaattoreiden tuottama pätöteho oikosulun ja johdon menettämisen seurauksena raskaassa kuormituksessa. Säädettävät generaattorit: 1–4.

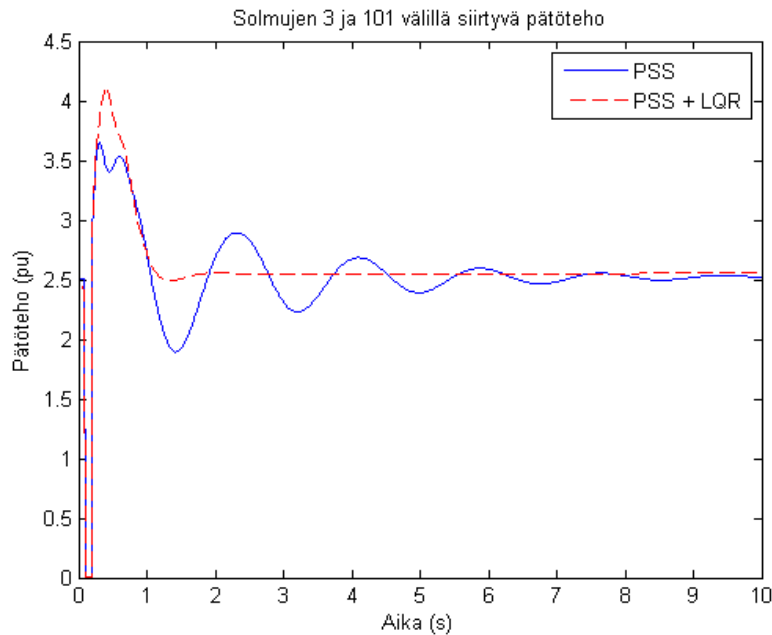
Generaattoreiden tuottaman pätötehon lisäksi tarkastellaan mallin alueiden välillä siirtyvää pätötehoa. Kuvissa 6.7–6.9 on esitetty toisessa solmujen 3 ja 101 välisessä johdossa siirtyvä pätöteho erilaisten vikojen seurauksena eri kuormitustilanteissa. Koska solmuja yhdistää kaksi identtistä johtoa, niiden välillä siirtyvä pätöteho on kaksinkertainen kuvassa 6.9 esitettyyn tehoon nähden. Siirtyvien tehojen kuvaajista voidaan havaita samankaltaisia ilmiöitä kuin generaattoreiden tuottamissa tehoissa. Kaikissa kuormituksissa heilahtelut vaimenevat nopeammin LQR-säädetyssä järjestelmässä, mutta siirtyvän tehon ylitys on myös suurempi. Siirtyvän tehon arvot asettuvat hieman eri pisteisiin LQR- ja PSS-säätimillä säädetyissä järjestelmissä, koska kuormat skaalautuvat vian seurauksen uudestaan solmujen jännitteiden funktiona kohdan 3.3.2 mukaisesti. LQR-säädetyssä järjestelmässä vasemmanpuoleiselta alueelta siirtyvä teho on siis suurempi kuin pelkillä PSS-säätimillä säädetyssä järjestelmässä.



Kuva 6.7 Solmujen 3 ja 101 välillä siirtyvä pätöteho oikosulun ja johdon menettämisen jälkeen normaalissa kuormituksessa.



Kuva 6.8 . Solmujen 3 ja 101 välillä siirtyvä pätöteho johdon menettämisen jälkeen kevyessä kuormituksessa.



Kuva 6.9. Solmujen 3 ja 101 välillä siirtyvä pätöteho oikosulun jälkeen raskaassa kuormituksessa.

Simulaatioiden perusteella havaittiin, että LQR-säädin kasvattaa järjestelmän vioista aiheutuvien tehoheilahtelujen vaimennusta merkittävästi. Suurin vaimennus saavutettiin, kun kaikkia neljää generaattoria ohjattiin LQR-säätimellä. Säätimen ja tilaestimaattorin havaittiin olevan robusti joillekin järjestelmän rakenteessa ja toimintapisteessä tapahtuville muutoksille. Kuormituksen kasvattaminen ja johdon menettäminen muutti säädetyn järjestelmän toiminnan kuitenkin epästabiiliksi. Tämä on säätimen suorituskyvyn kannalta huonoin mahdollinen tulos, sillä pelkillä PSS-säätimillä säädetty järjestelmä säilyi stabiilina. Kaikkien tehtyjen simulointien tulosten yhteenveto on esitetty taulukossa 6.9.

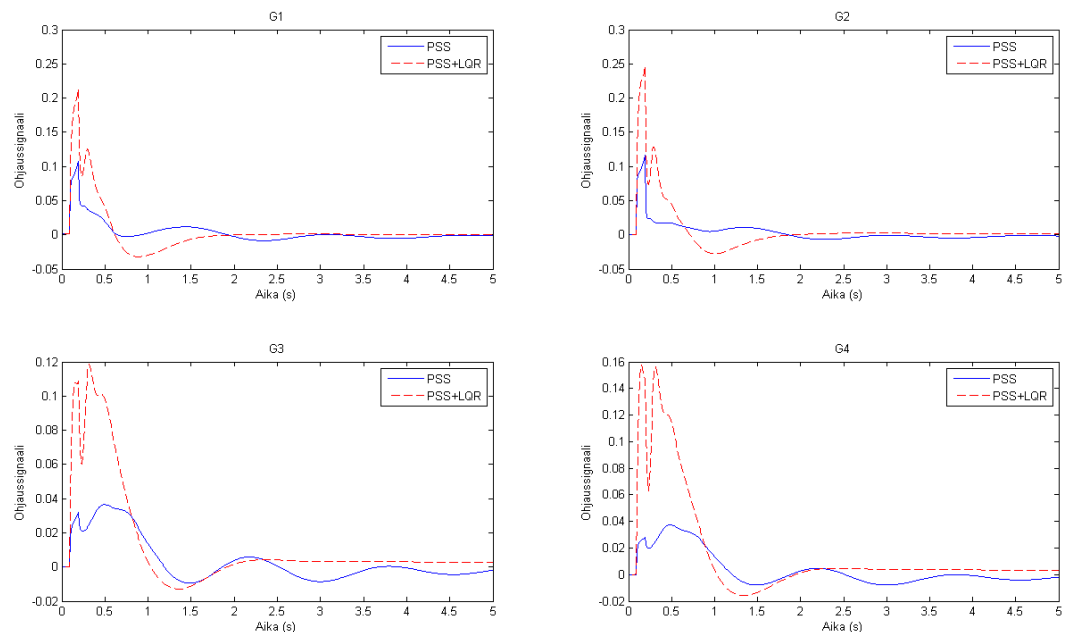
Taulukko 6.9. LQR-säätimen vaikutus tehoheilahtelujen vaimennukseen vikojen seurauksena eri kuormitustilanteissa. Positiivinen vaikutus tarkoittaa pelkillä PSS-säätimillä säädettyä järjestelmää parempaa vaimennusta. Epästabiili tarkoittaa, että järjestelmä käyttäytyy epästabiilisti.

Säädettävät Generaattorit	Oikosulku	Oikosulku + Johdon menettäminen	Johdon menettäminen
Normaali (100 %)			
3	Positiivinen	Positiivinen	Positiivinen
1–4	Positiivinen	Positiivinen	Positiivinen
Kevyt (60 %)			
3	Positiivinen	Positiivinen	Positiivinen
1–4	Positiivinen	Positiivinen	Positiivinen
Raskas (120 %)			
3	Positiivinen	Epästabiili	Epästabiili
1–4	Positiivinen	Epästabiili	Epästabiili

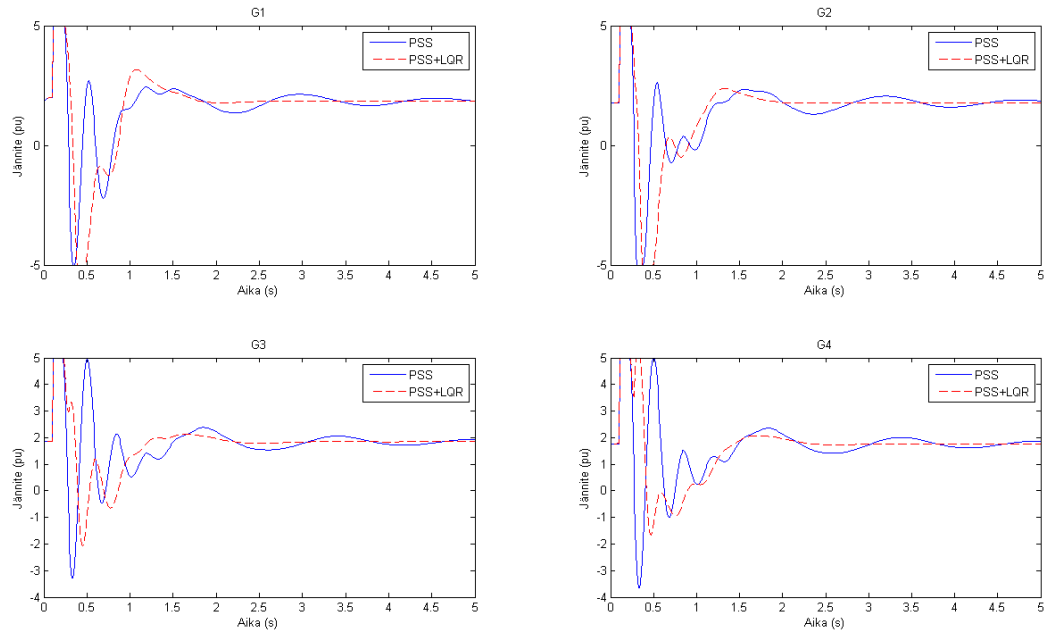
6.2.4 Ohjaussignaalit

Eräänä LQR-säätimen käyttöön liittyvänä ongelmana on, että sen tuottama ohjaussignaali ei ole rajoitettu. Todellisissa järjestelmissä käytettäviin säätimiin voidaan ja tuleekin toteuttaa rajoituksia. Tässä kohdassa vertaillaan lyhyesti LQR- ja PSS-säädinten tuottamia ohjaussignaaleita neljän generaattorin järjestelmän mallissa. Kaikki tarkastelut ovat tehty järjestelmän normaalissa kuormitusilanteessa.

Kuvassa 6.10 on esitetty sekä pelkillä PSS-säätimillä että LQR-säätimellä säädetyn järjestelmän generaattoreiden ohjaussignaalit oikosulun seurauksena. LQR-säädetyssä järjestelmässä ohjaussignaali sisältää sekä paikallisen PSS-säätimen että keskitetyn LQR-säätimen tuottaman ohjauksen. Kaikkia neljää generaattoria ohjaava LQR-säädin on muodostettu Q -matriisin alkioiden arvoilla 0,1. Tällöin säädintä muodostettaessa ohjauksen käyttämisestä sakotetaan voimakkaimmin minimoitaessa kustannusfunktioita (5.2). Oikosulun jälkeiset ohjaussignaalit ovat LQR-säädetyssä järjestelmässä pelkkää PSS-säädettyä järjestelmää suuremmat. Roottorikäämiin syötettävä tasajännite on esitetty kuvassa 6.11. Kuvasta nähdään, että vaikka LQR-säädetyssä käytettävät ohjaukset ovat suurempia, ei ohjausjännitteen vaihtelu ja saturoituminen ole merkittävästi voimakkaampaa. Lisäksi havaitaan, että LQR-säädetyssä järjestelmässä jännitteet asettuvat nopeammin.

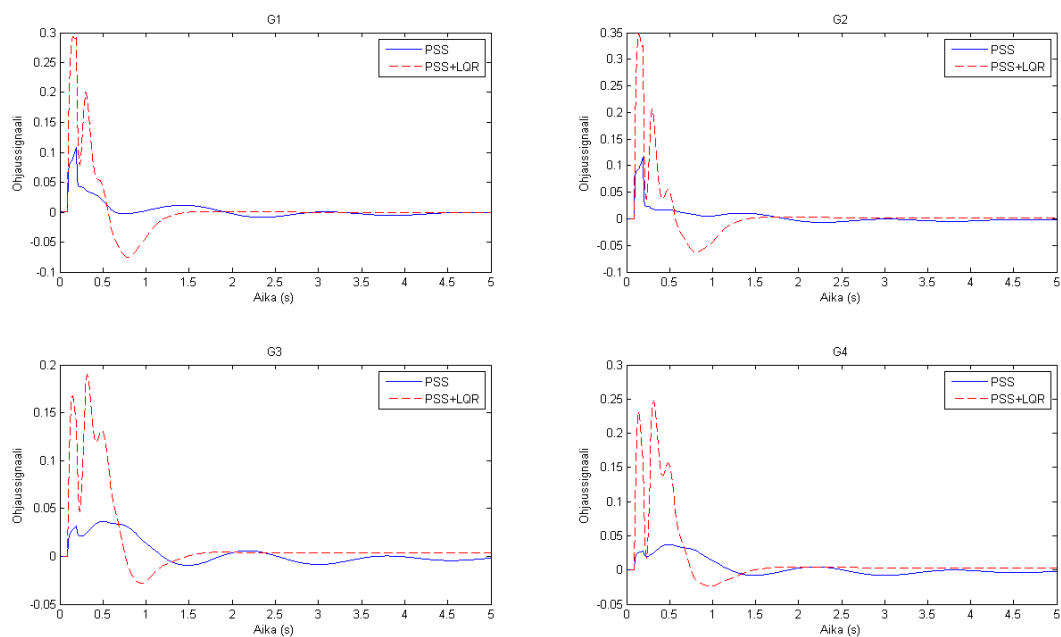


Kuva 6.10. Pelkillä PSS-säätimillä säädetyn järjestelmän PSS-säädinten ohjaussignaalit ja LQR-säädetyssä järjestelmän PSS- ja LQR-säädinten muodostama kokonaisohjaus normaalissa kuormituksessa oikosulun jälkeen

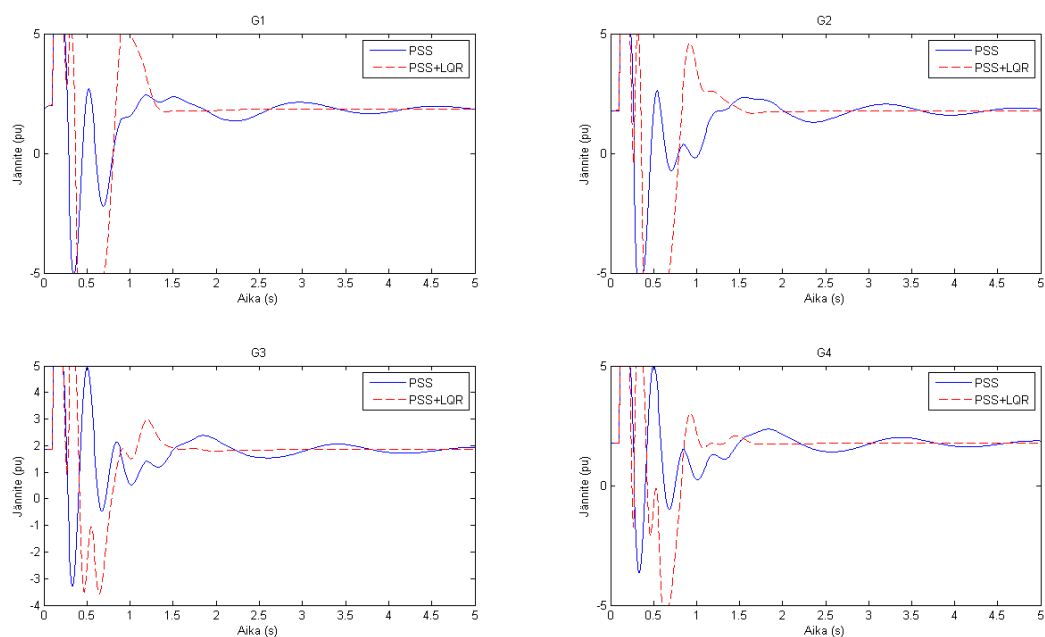


Kuva 6.11. Roottorikäämiin syötettävä tasajännite normaalissa kuormituksessa oikosulun jälkeen.

Ohjauksien käyttämisestä sakotetaan vähemmän, kun matriisin Q alkioden arvot ovat 1,0. Tässä tapauksessa ohjaussignaalit saman oikosulun jälkeen on esitetty kuvassa 6.12. Kuvasta nähdään, että LQR-säädetyssä järjestelmässä käytettävät ohjaukset ovat suurimmillaan noin 50 % suurempia kuin aiemmin. LQR-säätimen tuottaman ohjauksen vaikutus järjestelmän käyttäytymiseen on merkittävästi suurempi kuin PSS-säätimen. Tämä näkyy kuvan 6.13 roottorille syötettävässä jännitteessä, joka heilahtelee ja saturoituu voimakkaammin. Tuloksista nähdään, että Q -matriisin valitsemisella on merkittävä vaikutus säätöjärjestelmän ohjausten suuruuteen. Kohdassa 6.2.2 suurilla Q -matriisiin alkioden arvoilla muodostetuilla säätimillä saavutettiin teoriassa suurin vaimennus. Tehdyn tarkastelun perustella havaitaan, että simuloinneissa ongelmaksi muodostuu roottorijännitteen saturoituminen, joka rajoittaa tällä tavoin muodostettujen säädinten tehokkuutta.



Kuva 6.12. Pelkillä PSS-säätimillä säädetyn järjestelmän PSS-säädintien ohjaussignaalit ja LQR-säädetyin järjestelmän PSS- ja LQR-säädintien muodostama kokonaisohjaus normaalissa kuormituksessa oikosulun jälkeen.



Kuva 6.13. Roottorikäämiin syötettävä jännite normaalissa kuormituksessa oikosulun jälkeen.

6.3 Uuden-Englannin ja New Yorkin sähkönsiirtojärjestelmä

Neljän generaattorin sähkönsiirtojärjestelmän mallin tavoin 16 generaattorin Uuden-Englannin ja New Yorkin sähkönsiirtojärjestelmän mallia tarkastellaan kolmessa kuormitustilanteessa. Normaali kuormitus kuvaa järjestelmän toimintaa liitteessä B esitetyn tehonjaon määrittämässä toimintapisteessä. Kevyessä ja raskaassa kuormituksessa pätötehon kokonaistuotanto ja -kulutus on 60 % ja 120 % normaalista kuormituksesta. Toisin kuin neljän generaattorin järjestelmässä loistehon kulutus ei eroa kevyessä ja raskaassa kuormituksessa normaalista kuormituksesta. Loistehon kulutus voidaan pitää vakiona, koska järjestelmän useat generaattorit mahdollistavat tehonjaon, jossa yksittäisten generaattoreiden loistehon tuotanto tai kulutus ei kasva erittäin suureksi pätötehon tuotannon ja kulutuksen muutosten seurauksena.

6.3.1 Säättämättömän ja PSS-säädetyin järjestelmän lineaarinen analyysi

Taulukossa 6.10 on esitetty järjestelmän alueiden välisten moodien ominaisarvot sekä niitä vastaavat taajuudet ja vaimennussuhteet ζ prosentteina ilman PSS-säätimiä. Taulukoissa 6.11–6.13 samat arvot on esitetty pelkillä PSS-säätimillä säädetyille järjestelmälle kaikissa kolmessa kuormitustilanteessa. Nähdään, että PSS-säätimet vaikuttavat merkittävästi ainoastaan moodeihin 1 ja 3, koska säätimet ohjaavat alueiden 1 ja 2 generaattoreita 1–12. Moodien 2 ja 4 vaimennussuhteet eivät muutu merkittävästi lisättäessä PSS-säätimet. Tämän työn kannalta moodeista kiinnostavin on moodi 3, koska se on alueiden 1 ja 2 välinen. Siinä Uuden-Englannin generaattorit heilahtelevat New Yorkin generaattoreita vasten. Kaikissa muissa moodeissa vähintään toisena alueena on jokin alueista 3–5, jotka ovat kaikki generaattoriekvivalenteilla kuvattuja suurempia alueita. Näin ollen niiden ohjaaminen keskitetyllä LQR-säätimellä ei ole mielekäästä.

Taulukko 6.10. Säättämättömän järjestelmän alueiden väliset moodit normaalissa kuormituksessa.

Moodi	Ominaisarvo	Taajuus (Hz)	ζ (%)	Muoto
1	$-0,2085 \pm 2,4495j$	0,3899	8,48	2 vs 4
2	$-0,2682 \pm 3,2747j$	0,5212	8,16	3 vs 5
3	$-0,1367 \pm 4,2511j$	0,6766	3,21	1 vs 2
4	$-0,4268 \pm 4,9858j$	0,7935	8,53	3 vs 4

Taulukko 6.11. Paikallisilla PSS-säätimillä säädetyin järjestelmän alueiden väliset moodit normaalissa kuormituksessa. Säätimet generaattoreissa 1–12.

Moodi	Ominaisarvo	Taajuus (Hz)	ζ (%)	Muoto
1	$-0,3912 \pm 2,3853j$	0,3796	16,18	2 vs 4
2	$-0,2896 \pm 3,2743j$	0,5211	8,81	3 vs 5
3	$-0,6104 \pm 4,1279j$	0,6570	14,63	1 vs 2
4	$-0,4277 \pm 4,9855j$	0,7935	8,55	3 vs 4

Taulukko 6.12. Paikallisilla PSS-säätimillä säädetyn järjestelmän alueiden väliset moodit kevyessä kuormituksessa. Säätimet generaattoreissa 1–12.

Moodi	Ominaisarvo	Taajuus (Hz)	ζ (%)	Muoto
1	$-0,3483 \pm 2,6315j$	0,4188	13,12	2 vs 4
2	$-0,3517 \pm 3,4718j$	0,5526	10,08	3 vs 5
3	$-0,6063 \pm 4,2595j$	0,6779	14,09	1 vs 2
4	$-0,4514 \pm 5,0373j$	0,8017	8,93	3 vs 4

Taulukko 6.13. Paikallisilla PSS-säätimillä säädetyn järjestelmän alueiden väliset moodit raskaassa kuormituksessa. Säätimet generaattoreissa 1–12.

Moodi	Ominaisarvo	Taajuus (Hz)	ζ (%)	Muoto
1	$-0,4181 \pm 2,1003j$	0,3343	19,53	2 vs 4
2	$-0,2522 \pm 3,0700j$	0,4886	8,19	3 vs 5
3	$-0,5948 \pm 4,0137j$	0,6388	14,66	1 vs 2
4	$-0,4143 \pm 4,9371j$	0,7858	8,36	3 vs 4

6.3.2 LQR-säädetyt järjestelmän lineaarinen analyysi

Käytettävä LQR-säädin suunniteltiin vaimentamaan alueiden 1 ja 2 välistä moodia. Taulukoissa 6.14–6.16 on esitetty säädetyn järjestelmän $A-BK$ alueiden välistä moodia vastaavat ominaisarvot, taajuudet ja vaimennussuhteet ζ erilaisilla säätimillä kaikissa kolmessa kuormitustilanteessa. Käytettävät viisi säätökonfiguraatiota on kuvattu kohdassa 6.1. Neljän generaattorin järjestelmän tavoin LQR-säätimet on suunniteltu normaalissa kuormituksessa muodostetun järjestelmän lineaarisen tilaesityksen avulla. Tilamuuttujien painomatriisin Q alkiot on asetettu nolasta poikkeaviksi ainoastaan säädettävien generaattoreiden roottorikulmaa ja kulmanopeutta vastaaville tiloille. Säätimien muodostamisessa käytettävät Q -matriisin alkioiden arvot ovat 0,1, 0,5 ja 1,0. Systeemi- ja painomatriisin dimensiot Uuden-Englannin ja New Yorkin sähkönsiirtojärjestelmän mallin tapauksessa ovat 148×148 . Kaikilla tarkastelluilla LQR-säätimillä järjestelmän kaikki muut ominaisarvot olivat kompleksitason vasemmassa puolitasossa eli lineaarisen analyysin mukaan LQR-säädin ei muuttanut pelkillä PSS-säätimillä säädetyn järjestelmän stabiilia käyttäytymistä epästabiiliksi.

Taulukosta 6.14 nähdään, että ohjaamalla ainoastaan yhtä generaattoria keskitetyllä säätimellä on hyvin vähäinen vaikutus vaimennukseen. Generaattoria 12 ohjaavan säätimen tapauksessa LQR-säätimellä on jopa negatiivinen vaikutus vaimennukseen. Kasvattamalla säädettävien generaattoreiden lukumäärä neljään, saavutetaan parempi vaimennus. Tulosten perusteella suuremman vaimennuksen tuottama generaattoreiden valintaperuste riippuu säätimen muodostamisessa käytetyistä painokertoimista. Painokertoimilla 0,1 osallistumiskerrointen perusteella valittujen generaattoreiden ohjaaminen tuottaa suuremman vaimennuksen. Painoilla 0,5 vaimennus on lähes sama kummallakin valintaperusteella, mutta painokertoimilla 1,0 ohjattavuus on parempi valintaperuste. Lisäksi tulosten perusteella painokertoimien kasvattaminen kasvattaa tarkasteltavan moodin taajuutta. Taulukosta huomataan myös, että kun säädettävät generaattorit on valittu osallistumiskerrointen perusteella, painokertoimien vaikutus

moodin taajuuteen on voimakkaampi. Lisäksi painokertoimien kasvattaminen arvosta 0,5 arvoon 1,0 heikentää moodin vaimennusta, kun generaattorit on valittu osallistumiskerrointen perusteella.

Mikäli keskitetyllä LQR-säätimellä ohjataan kaikkia generaattoreita, alueiden 1 ja 2 välisen moodin vaimennussuhde on selvästi suurempi kuin yhden ja neljän generaattorin säätökonfiguraatioilla. Taulukosta nähdään myös säätimen suunnittelussa käytettävän painokertoimen merkitys. Kertoimen arvolla 0,5 vaimennus on selvästi voimakkaampaa kuin kertoimen arvolla 0,1. Arvolla 1,0 moodin vaimennus on kuitenkin lähes sama kuin arvolla 0,5 eikä kertoimen kasvattaminen tuota täten merkittävää etua.

Taulukko 6.14. LQR-säädetyin järjestelmän A–BK alueiden 1 ja 2 välinen moodi normaalissa kuormituksessa eri painomatriiseilla Q ja säätökonfiguraatioilla.

Säädettävät generaattorit	Painot $[q_{di} \ q_{oi}]$	Ominaisarvo	Taajuus (Hz)	ζ (%)
6	1,0	$-0,8249 \pm 4,3145j$	0,6867	18,78
6	0,5	$-0,7932 \pm 4,2787j$	0,6810	18,23
6	0,1	$-0,6939 \pm 4,1875j$	0,6665	16,35
12	1,0	$-0,5927 \pm 4,2241j$	0,6723	13,90
12	0,5	$-0,5985 \pm 4,2064j$	0,6695	14,09
12	0,1	$-0,6082 \pm 4,1593j$	0,6620	14,47
4, 5, 6, 7	1,0	$-1,2904 \pm 5,4242j$	0,8633	22,97
4, 5, 6, 7	0,5	$-1,4978 \pm 5,1832j$	0,8249	27,76
4, 5, 6, 7	0,1	$-1,1192 \pm 4,3070j$	0,6855	25,15
4, 6, 9, 12	1,0	$-1,4681 \pm 4,7760j$	0,7601	29,38
4, 6, 9, 12	0,5	$-1,3356 \pm 4,5927j$	0,7310	27,92
4, 6, 9, 12	0,1	$-0,9371 \pm 4,2741j$	0,6802	21,42
1 - 12	1,0	$-4,1968 \pm 5,6535j$	0,8998	59,61
1 - 12	0,5	$-3,4037 \pm 4,8981j$	0,7796	57,07
1 - 12	0,1	$-1,6012 \pm 3,9639j$	0,6309	37,46

Alueiden 1 ja 2 välisen moodin ominaisarvot kevyessä kuormituksessa ovat taulukossa 6.15. Kevyessä kuormituksessa vaimennussuhteet ovat kaikissa tapauksissa pienempiä kuin normaalissa kuormituksessa, jossa käytettävät LQR-säätimet on suunniteltu. Yksittäisistä generaattoreista generaattorin 6 ohjaaminen tuottaa paremman vaimennuksen kuin generaattorin 12 ohjaaminen. Pelkän generaattorin 12 säätäminen voi myös heikentää vaimennusta verrattuna pelkillä PSS-säätimillä ohjattuun järjestelmään. Neljää generaattoria ohjaamalla paras vaimennus saavutetaan valitsemalla ohjattavat generaattorit osallistumiskerrointen perusteella ja käyttämällä painokertoimia 0,5. Painokertoimien muuttaminen vaikuttaa voimakkaammin moodin taajuuteen, kun säädettävät generaattorit ovat osallistumiskerrointen perusteella. Tällöin myös painokertoimien kasvattaminen arvoon 1,0 heikentää moodin vaimennusta. Tämä ilmiö ei kuitenkaan esiinny, mikäli generaattorit on valittu ohjattavuuden perusteella. Kaikkein suurin vaimennus saavutetaan ohjaamalla kaikkia generaattoreita LQR-säätimellä, joka on muodostettu painokertoimilla 1,0. Vaimennussuhde on kuitenkin merkittävästi pienempi kuin järjestelmän normaalissa kuormituksessa.

Taulukko 6.15. LQR-säädetyin järjestelmän $A-BK$ alueiden 1 ja 2 välinen moodi kevyessä kuormituksessa eri painomatriiseilla Q ja säätökonfiguraatioilla.

Säädettävät generaattorit	Painot $[q_{\delta i} \ q_{\omega i}]$	Ominaisarvo	Taajuus (Hz)	ζ (%)
6	1,0	$-0,7250 \pm 4,4218j$	0,7038	16,18
6	0,5	$-0,7048 \pm 4,3950j$	0,6995	15,83
6	0,1	$-0,6513 \pm 4,3213j$	0,6878	14,90
12	1,0	$-0,5995 \pm 4,3227j$	0,6880	13,74
12	0,5	$-0,6016 \pm 4,3086j$	0,6857	13,83
12	0,1	$-0,6051 \pm 4,2741j$	0,6803	14,02
4, 5, 6, 7	1,0	$-1,1612 \pm 5,0521j$	0,8041	22,40
4, 5, 6, 7	0,5	$-1,1506 \pm 4,8423j$	0,7707	23,12
4, 5, 6, 7	0,1	$-0,8939 \pm 4,4339j$	0,7057	19,76
4, 6, 9, 12	1,0	$-1,1207 \pm 4,7390j$	0,7542	23,01
4, 6, 9, 12	0,5	$-1,0383 \pm 4,6291j$	0,7367	21,89
4, 6, 9, 12	0,1	$-0,8163 \pm 4,3966j$	0,6997	18,26
1 - 12	1,0	$-2,3503 \pm 5,3102j$	0,8451	40,47
1 - 12	0,5	$-1,9494 \pm 4,8968j$	0,7794	36,99
1 - 12	0,1	$-1,1619 \pm 4,3988j$	0,7001	25,54

Lineaarisen analyysin tulokset raskaassa kuormituksessa on esitetty taulukossa 6.16. Tuloksista nähdään, että vaimennus on useimmissa tapauksissa hyvin lähellä järjestelmän nimellisessä toimintapisteessä saavutettua vaimennusta. Saatujen tulosten perusteella moodi on vaimennettu selvästi paremmin raskaassa kuin kevyessä kuormituksessa. LQR-säätimen vaikutus ohjattaessa ainoastaan yhtä generaattoria on joko hyvin vähäinen tai negatiivinen. Neljän generaattorin säätökonfiguraatiossa saavutetaan suurin vaimennus valitsemalla säädettävät generaattorit osallistumiskertoimia käyttämällä ja painokertoimilla 1,0. Huomattava ero vaimennussuhteissa verrattuna taulukossa 6.14 esitettyihin tuloksiin nähdään säädettäessä kaikkia generaattoreita keskitetysti. Sama säädin tuottaa raskaassa kuormituksessa vähintään 10 prosenttiyksikköä suuremman vaimennuksen verrattuna normaaliin kuormitukseen, vaikka säädin on suunniteltu järjestelmän normaalia kuormitusta kuvaavan tilaesityksen perusteella.

Taulukko 6.16. LQR-säädetyin järjestelmän A–BK alueiden 1 ja 2 välinen moodi raskaassa kuormituksessa eri painomatriiseilla Q ja säätökonfiguraatioilla.

Säädettävät generaattorit	Painot $[q_{\delta i} \ q_{\omega i}]$	Ominaisarvo	Taajuus (Hz)	ζ (%)
6	1,0	$-0,8497 \pm 4,2085j$	0,6698	19,79
6	0,5	$-0,8122 \pm 4,1647j$	0,6628	19,14
6	0,1	$-0,6891 \pm 4,0639j$	0,6468	16,72
12	1,0	$-0,5767 \pm 4,1332j$	0,6578	13,82
12	0,5	$-0,5847 \pm 4,1124j$	0,6545	14,08
12	0,1	$-0,5963 \pm 4,0572j$	0,6457	14,54
4, 5, 6, 7	1,0	$-1,2067 \pm 5,5320j$	0,8805	21,31
4, 5, 6, 7	0,5	$-1,5452 \pm 5,4498j$	0,8674	27,28
4, 5, 6, 7	0,1	$-1,2042 \pm 4,1399j$	0,6589	27,93
4, 6, 9, 12	1,0	$-1,6401 \pm 4,7300j$	0,7528	32,76
4, 6, 9, 12	0,5	$-1,4702 \pm 4,4856j$	0,7139	31,15
4, 6, 9, 12	0,1	$-0,9559 \pm 4,1447j$	0,6596	22,47
1 - 12	1,0	$-5,6469 \pm 5,8208j$	0,9264	69,63
1 - 12	0,5	$-4,4478 \pm 4,7678j$	0,7588	68,21
1 - 12	0,1	$-2,1057 \pm 3,2916j$	0,5239	53,89

Uuden-Englannin ja New Yorkin sähkönsiirtojärjestelmän mallin lineaarisessa analyysissä havaittiin, että keskitetyllä LQR-säätimellä voidaan kasvattaa tehoheilahtelujen vaimennusta. Tulosten perusteella suurin vaimennus saavutetaan ohjaamalla kaikkia generaattoreita ja säätimellä pystyttiin kasvattamaan vaimennusta myös järjestelmän muissa toimintapisteissä, vaikka käytettävä säädin oli suunniteltu järjestelmän nimellisessä toimintapisteessä.

6.3.3 Epälineaariset simuloinnit

Uuden-Englannin ja New Yorkin sähkönsiirtojärjestelmän mallin käyttäytymistä kolmen erilaisen häiriön jälkeen tutkitaan epälineaaristen aikatazon simulaatioiden avulla. Simuloitavat häiriöt ovat:

- 100 ms pituinen oikosulku solmussa 1 ajanhetkellä 100 ms,
- 100 ms pituinen oikosulku solmussa 1 ja alueita 1 ja 2 yhdistävän solmujen 1 ja 2 välisen johdon menettäminen oikosulun jälkeen,
- Alueita 1 ja 2 yhdistävän solmujen 1 ja 2 välisen johdon menettäminen ajanhetkellä 100 ms.

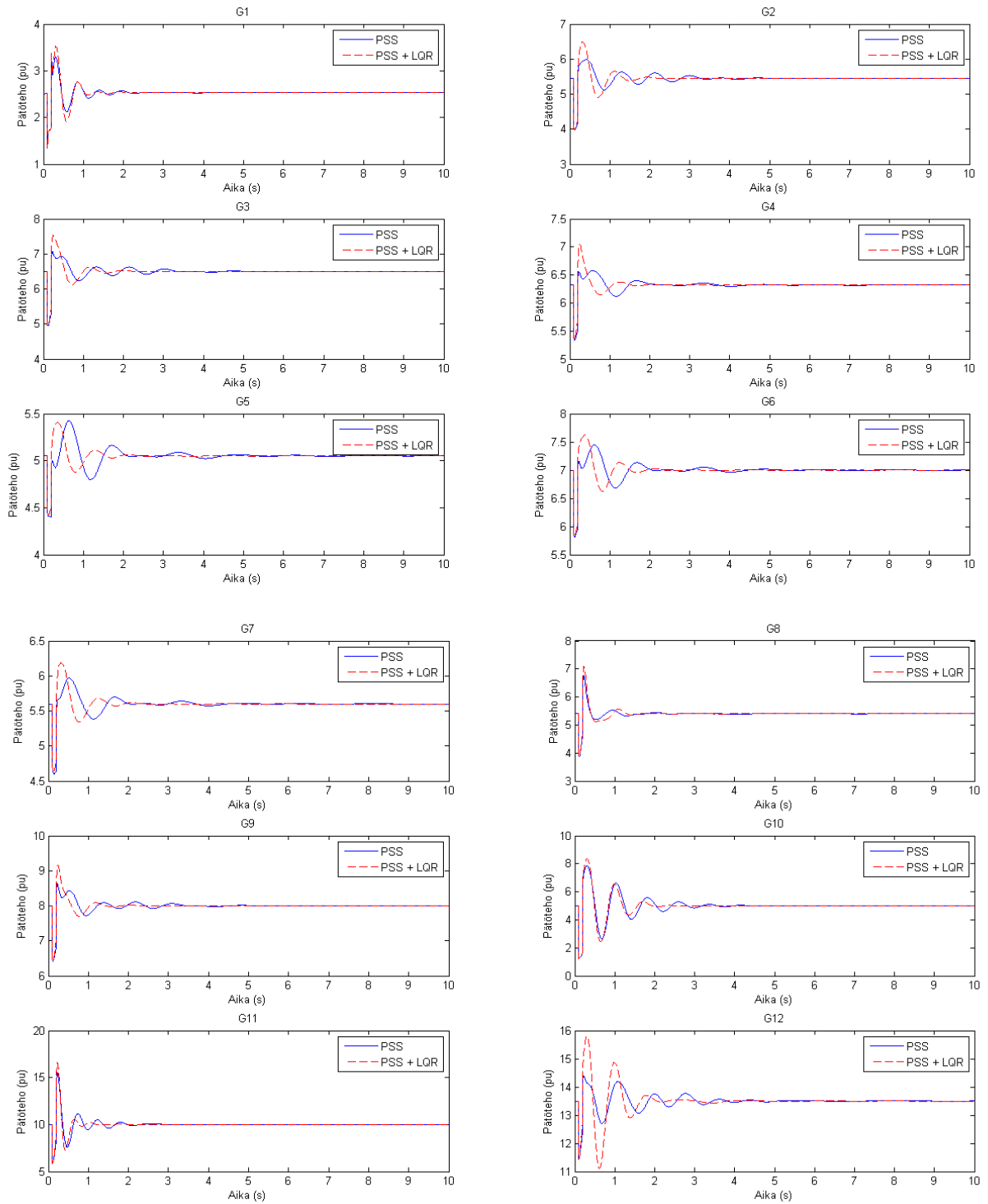
Käytettävät LQR-säätimet on muodostettu Q -matriisiin alkioden arvoilla 1. Käytettävät Kalman-suotimen parametrit ovat

$$W = 10^{-1} \times I, V = 10^{-3} \times I.$$

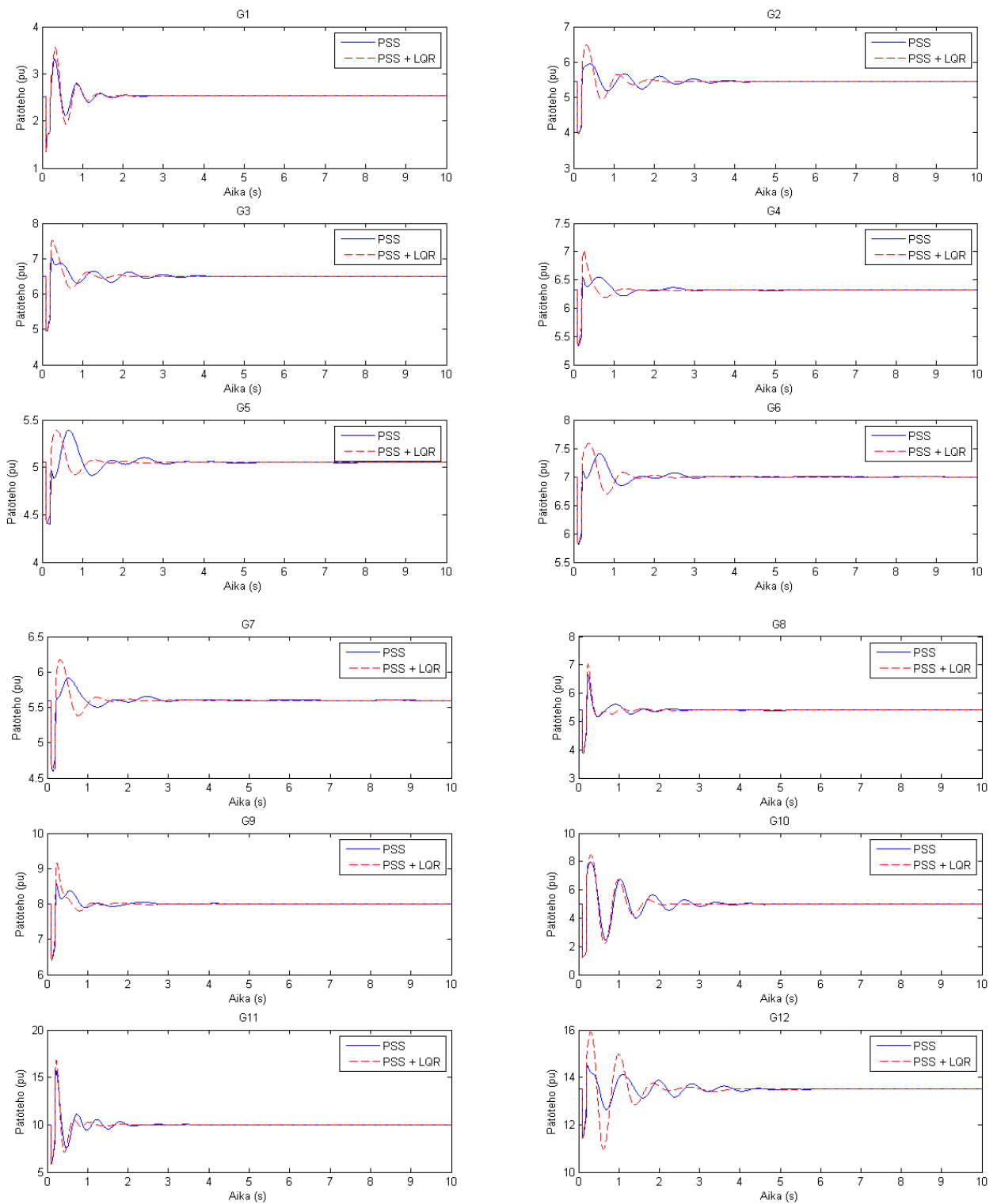
Generaattoreiden tehovasteet vikojen jälkeen on esitetty kuvissa 6.14–6.18 sekä liitteessä E. Ohjattaessa generaattoreita 4, 6, 9 ja 12 havaitaan, että kyseisten generaattoreiden tehoheilahtelut vaimenevat oikosulun jälkeen nopeammin kuin käytettäessä pelkkiä PSS-säätimiä. Generaattorin 12 tapauksessa tehon ylitys ja ensimmäiset heilahdukset ovat

kuitenkin suurempia LQR-säädetyssä järjestelmässä. Säätimen vaikutus joidenkin generaattoreiden toimintaan on hyvin vähäinen ja generaattoreiden 1, 10 ja 11 tuottamissa tehoissa ei havaita muutosta LQR-säädetyssä järjestelmässä. Ohjattaessa LQR-säätimellä kaikkia 12:ta generaattoria, tehoheilahtelujen havaitaan vaimentuvan nopeammin. Tehovasteiden ylitykset ovat kuitenkin suurempia ja etenkin generaattorin 12 heilahtelut ovat LQR-säädetyssä järjestelmässä aluksi amplitudiltaan selvästi voimakkaampia kuin käytettäessä pelkkiä PSS-säätimiä. Mikäli oikosulun seurauksena alueita 1 ja 2 yhdistävä johto menetetään, käyttäytyvät generaattoreiden tuottamat tehot hyvin samankaltaisesti kuin pelkän oikosulun jälkeen. Kun johto menetetään ilman oikosulkua, generaattoreiden tehoheilahtelut ovat amplitudiltaan selvästi pienempiä. Neljää generaattoria ohjaavan LQR-säätimen vaikutus näkyy jälleen vain osassa generaattoreita, mutta kaikkia generaattoreita ohjaava säädin vaimentaa jokaisen generaattorin heilahtelut selvästi pelkkiä PSS-säätimiä tehokkaammin.

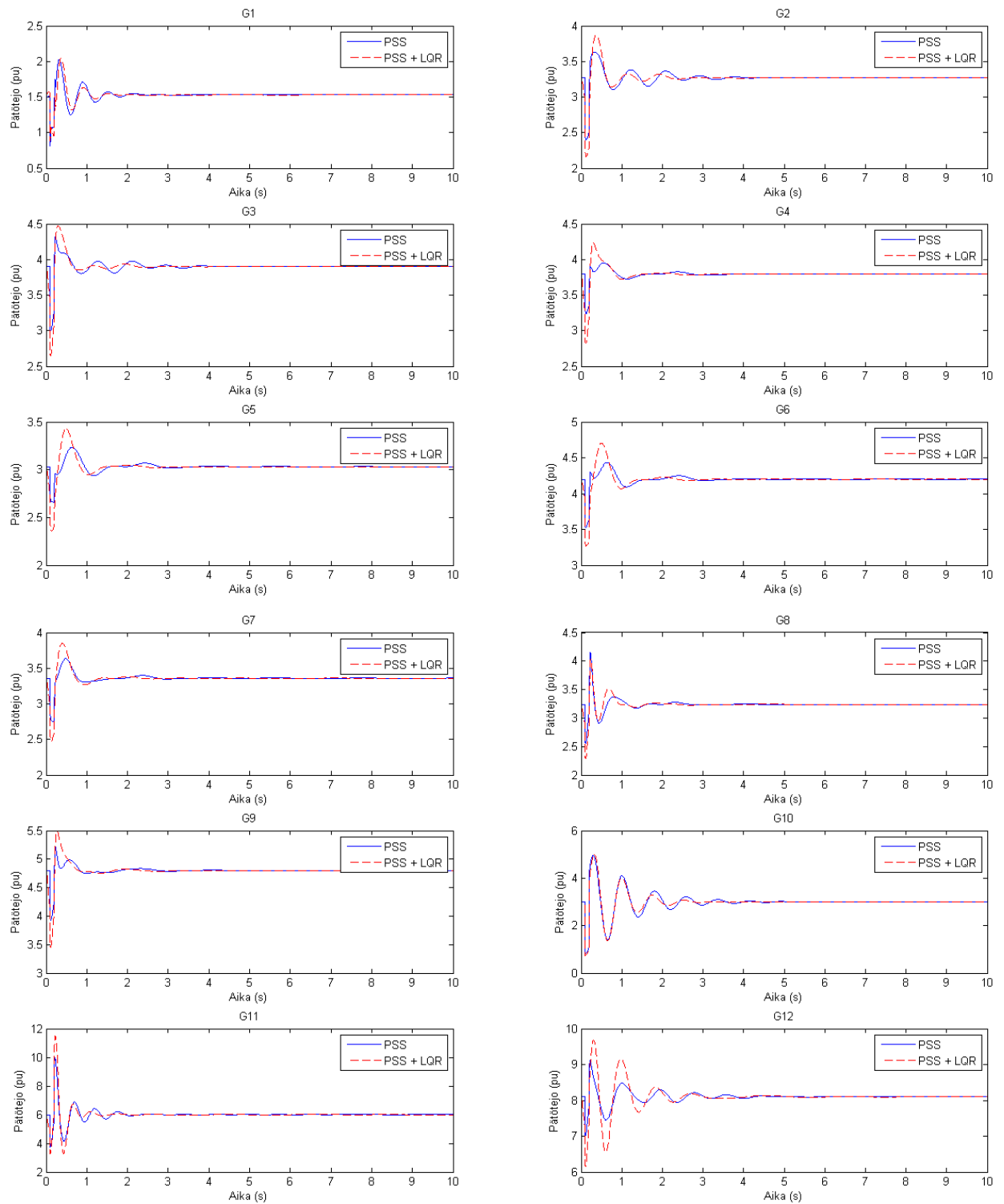
Kevyessä kuormituksessa LQR-säätimen tehokkuus oikosulkuvikoja seuraavien tehoheilahtelujen vaimentamisessa on heikompi kuin normaalissa kuormituksessa ja kohdan 6.2.2 mukaisen lineaarisen analyysin vaimennuksia ei saavuteta. Generaattoreiden 4, 5, 6, 7, 9 ja 12 tehovasteiden ylitykset ovat selvästi suuremmat LQR-säädetyssä järjestelmässä, mutta tehojen asettumisajoissa ei ole merkittäviä eroja. Menetettäessä johto ilman oikosulkua, tehoheilahtelut ovat amplitudiltaan suurempia LQR-säädetyssä järjestelmässä kuin käytettäessä pelkkiä PSS-säätimiä. Tilaestimaattori reagoi voimakkaasti järjestelmässä tapahtuvaan muutokseen ja seurauksena LQR-säätimen tuottama ohjaussignaali aiheuttaa generaattoreiden tehojen heilahteluja. Viimeisenä Uuden-Englannin ja New Yorkin sähkönsiirtojärjestelmän mallia simuloitiin raskaassa kuormituksessa. Oikosulkuvikojen jälkeen generaattoreiden tehoheilahtelut ovat vaimentuneet tehokkaammin LQR-säädetyssä järjestelmässä kuin pelkillä PSS-säätimillä. Pelkän johdon menettämisen seurauksena LQR-säätimellä on negatiivinen vaikutus, ja se aikaansaa amplitudiltaan suurempia heilahteluja, jotka kuitenkin vaimenevat.



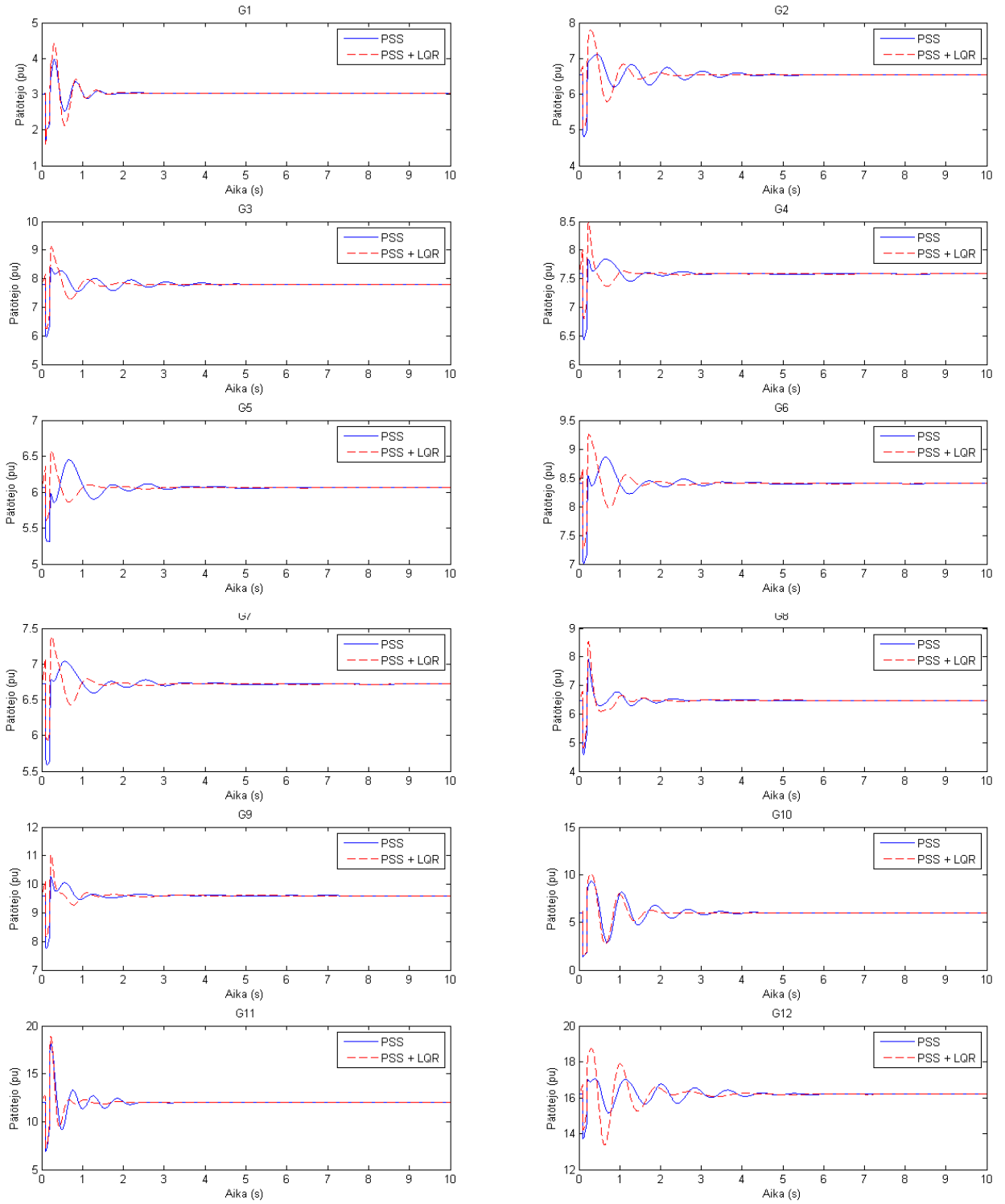
Kuva 6.14. Generaattoreiden 1–12 tuottama pätöteho oikosulun seurauksena normaalissa kuormituksessa. Säädettävät generaattorit: 1–12.



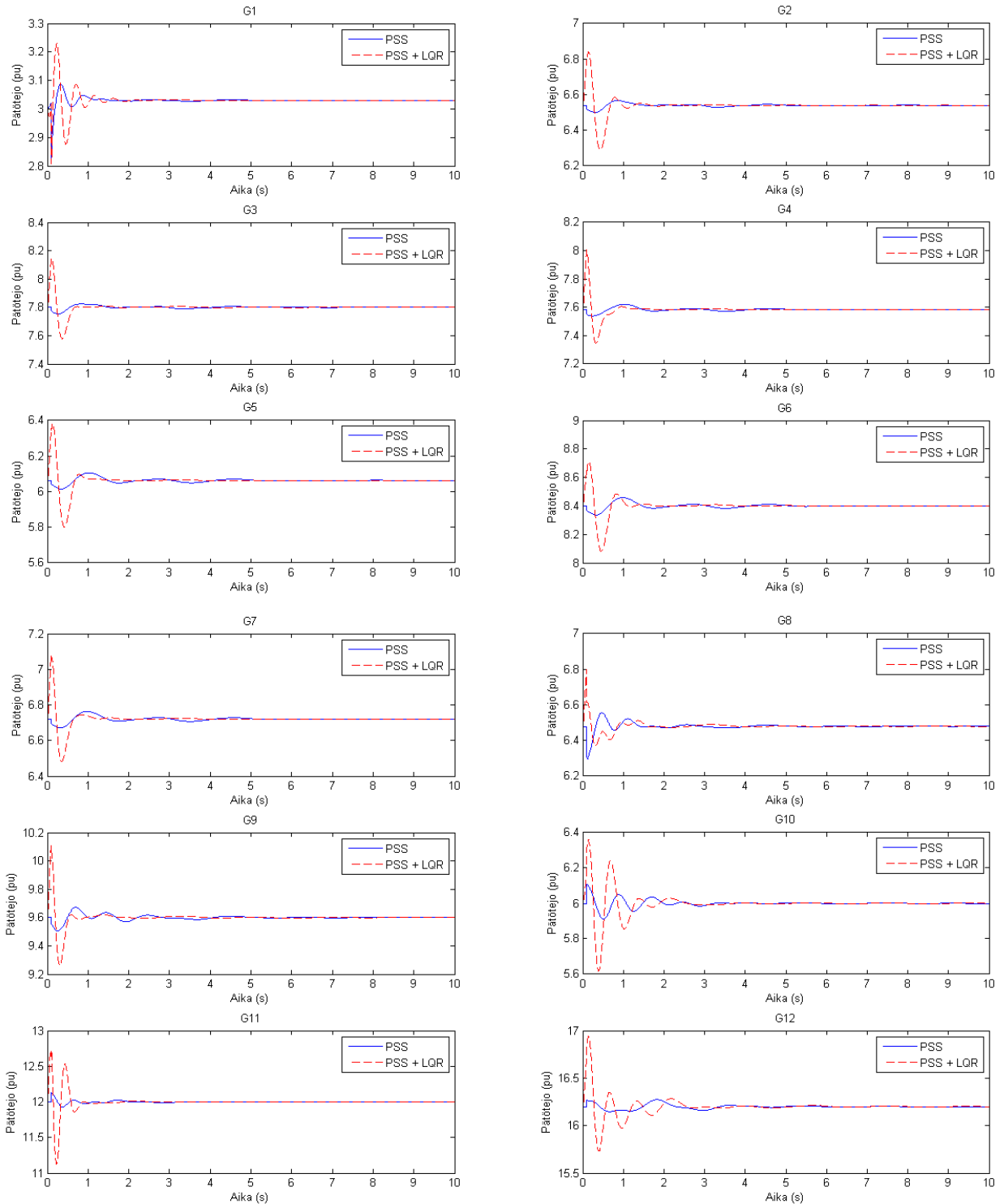
Kuva 6.15. Generaattoreiden 1–12 tuottama pätöteho oikosulun ja johdon menettämisen seurauksena normaalissa kuormituksessa. Säädettävät generaattorit: 1–12.



Kuva 6.16. Generaattoreiden 1–12 tuottama pätöteho oikosulun ja johdon menettämisen seurauksena kevyessä kuormituksessa. Säädettävät generaattorit: 1–12.



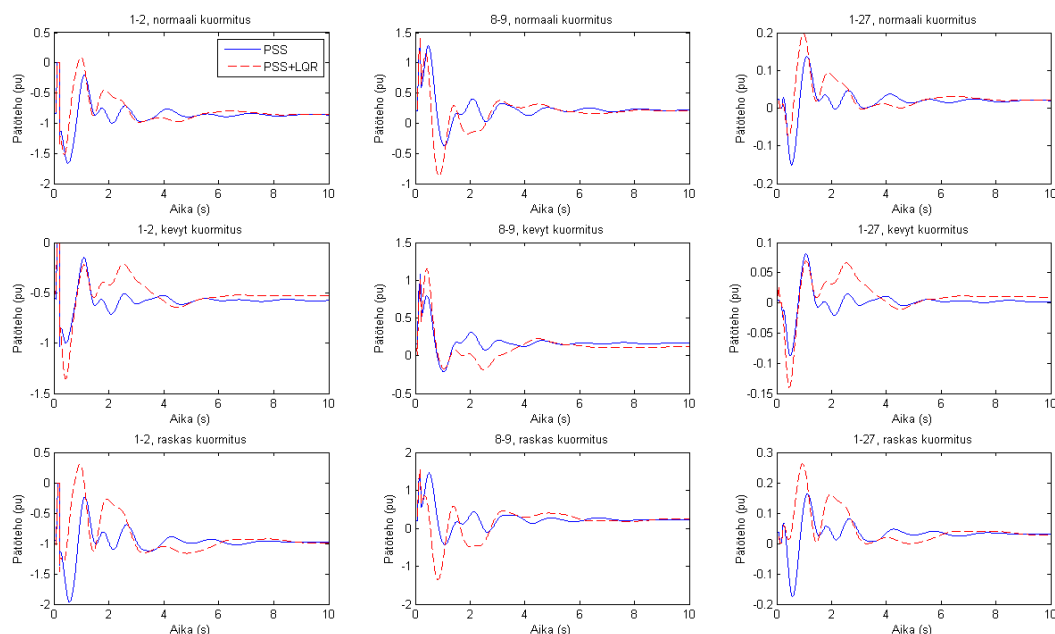
Kuva 6.17. Generaattoreiden 1–12 tuottama pätöteho oikosulun ja johdon menettämisen seurauksena raskaassa kuormituksessa. Säädetävät generaattorit: 1–12.



Kuva 6.18. Generaattoreiden 1–12 tuottama pätöteho johdon menettämisen seurauksena raskaassa kuormituksessa. Säädettyvät generaattorit: 1–12.

Viimeiseksi tarkastellaan alueiden 1 ja 2 välillä siirtyvää tehoa. Kuvassa 6.19 on esitetty alueita 1 ja 2 yhdistävillä johdoilla siirtyvä pätöteho oikosulun jälkeen kaikissa kolmessa kuormitustilanteessa, kun generaattoreita 1–12 ohjataan LQR-säätimellä. Kuvasta nähdään, että LQR-säätimen vaikutus siirtyvän tehon heilahteluihin on vähäinen. Tämä on seurausta alueessa 2 sijaitsevasta generaattorista 13, jota ei ohjata PSS- tai LQR-

säätimellä. Generaattorin tuottama pätöteho on normaalissa kuormituksessa noin 3600 MW eli sen tehotuotanto on melkein kolminkertainen toiseksi suurimpaan generaattoriin 12 nähden. Täten säätämättömän generaattorin 13 käyttäytyminen vaikuttaa hyvin voimakkaasti alueiden välillä siirtyvään tehoon.



Kuva 6.19. Alueita 1 ja 2 yhdistävissä johdoissa siirtyvä pätöteho oikosulun seurauksena.

Uuden-Englannin ja New Yorkin sähkönsiirtojärjestelmän mallin simulointitulosten yhteenveto on esitetty taulukossa 6.17. Simulaatioiden perusteella voidaan todeta, että LQR-säätimen suorituskyky heikkeni järjestelmän toimintapisteen ja topologian muutosten seurauksena ja keskitetyllä säätimellä ei pystytty saavuttamaan lineaarisen analyysin mukaista vaimennusta.

Taulukko 6.17. LQR-säätimen vaikutus eri vikojen seurauksena tapahtuviin tehoheilahteluihin eri kuormitustilanteissa.

Säädettävät Generaattorit	Oikosulku	Oikosulku + Johdon menettäminen	Johdon menettäminen
Normaali (100 %)			
4, 6, 9, 12	Positiivinen	Positiivinen	Positiivinen
1-12	Positiivinen	Positiivinen	Positiivinen
Kevyt (60 %)			
4, 6, 9, 12	Vähäinen	Vähäinen	Negatiivinen
1-12	Vähäinen	Vähäinen	Negatiivinen
Raskas (120 %)			
4, 6, 9, 12	Vähäinen	Vähäinen	Negatiivinen
1-12	Positiivinen	Positiivinen	Negatiivinen

7 Yhteenveto

Tässä luvussa esitellään ensin työn keskeisimmät tulokset ja tarkastellaan niiden merkitystä. Tämän jälkeen käydään läpi muutamia tulevaisuuden tutkimusaiheita.

7.1 Tulokset ja johtopäätökset

Työn tavoitteena oli tarkastella keskitetyn LQR-säätimen vaikutusta kahden sähkönsiirtojärjestelmän alueiden välisiin heilahteluihin. Säädinten vaikutusta tarkasteltiin sekä lineaarisen analyysin että epälineaaristen aikatazon simulaatioiden avulla.

Neljän generaattorin sähkönsiirtojärjestelmän mallin LQR-säädetyssä järjestelmän lineaarisessa analyysissä havaittiin, että jo yhden generaattorin ohjaaminen kasvatti alueiden välisen moodin vaimennusta verrattuna pelkillä PSS-säätimillä ohjattuun järjestelmään. Suurempi vaimennus saavutettiin ohjaamalla kaikkia generaattoreita. Vaimennuksen havaittiin myös kasvavan, kun tilamuuttujien poikkeamista sakotettiin voimakkaammin muodostettaessa LQR-säädintä. Säätimen todettiin kasvattavan vaimennusta järjestelmän toimintapisteen muuttuessa.

Aikatazon vikasimulaatioissa havaittiin, että joissakin tilanteissa LQR-säädetyssä järjestelmässä generaattoreiden tuottamien pätötehojen heilahtelut vaimenivat nopeammin kuin käytettäessä pelkkiä PSS-säätimiä. Suurin vaimennus saavutettiin säätämällä kaikkia generaattoreita. Kaikkia generaattoreita käyttävän LQR-säätimen tapauksessa joidenkin generaattoreiden tehovasteiden ylitysten havaittiin olevan kuitenkin suurempia kuin käytettäessä pelkkiä PSS-säätimiä. Säätimen todettiin olevan myös robusti joillekin sähkönsiirtojärjestelmän toimintapisteen ja topologian muutoksille. Säädin kasvatti tehoheilahtelujen vaimennusta pelkän oikosulun jälkeen kaikissa kuormituksissa. Järjestelmän normaalissa sekä kevyessä kuormituksessa LQR-säädin kasvatti vaimennusta myös oikosulun ja johdon menettämisen seurauksena. LQR-säädetty järjestelmä muuttui kuitenkin epästabiiliksi raskaassa kuormituksessa johdon menettämisen seurauksena, vaikka pelkillä PSS-säätimillä säädetty järjestelmä säilyi stabiilina.

Uuden-Englannin ja New Yorkin sähkönsiirtojärjestelmän mallin lineaarisessa analyysissä yksittäisen generaattorin ohjaamisella havaittiin olevan pieni tai negatiivinen vaikutus alueiden välisen moodin vaimennukseen. Neljää generaattoria ohjaavalla LQR-säätimellä saavutettiin suurempi vaimennus. Kaikkein voimakkaimmin alueiden välinen moodi oli vaimennettu ohjattaessa generaattoreita 1–12 keskitetyllä LQR-säätimellä. Kuvatut tulokset havaittiin kaikissa kolmessa tarkastellussa kuormitustilanteessa.

Epälineaarisissa aikatazon simulaatioissa havaittiin, että generaattoreiden tuottamien tehojen heilahtelut riippuivat voimakkaasti LQR-säätimellä ohjatuista generaattoreista. Ohjaamalla neljää generaattoria, kyseisten generaattoreiden vikojen jälkeisten tehoheilahtelujen havaittiin vaimenevan nopeammin. Säätimen vaikutus muihin generaattoreihin oli kuitenkin vähäinen. Säätämällä generaattoreita 1–12 havaittiin positiivinen vaikutus vaimennukseen lähes kaikissa generaattoreissa.

Järjestelmän toimintapisteen muuttaminen vaikutti LQR-säätimen tehokkuuteen. Kevyessä kuormituksessa LQR-säätimellä saavutettava vaimennus oikosulkuvikojen seurauksena oli hyvin lähellä pelkillä PSS-säätimillä saavutettua vaimennusta. Pelkän johdon menettämisen seurauksena LQR-säädetyssä järjestelmässä tehoheilahtelut olivat kuitenkin amplitudiltaan selvästi PSS-säädetyssä järjestelmässä tapahtuvia heilahteluja suurempia. Raskaassa kuormituksessa LQR-säädin vaimensi heilahtelut oikosulkujen seurauksena pelkkiä PSS-säätimiä tehokkaammin, mutta pelkän johdon menettämisen seurauksena sillä oli negatiivinen vaikutus. Johdon menettäminen ilman oikosulkua aiheutti generaattoreiden tehoihin heilahteluja, jotka eivät esiintyneet pelkillä PSS-säätimillä ohjatussa järjestelmässä.

Havaittiin, että keskitetyllä LQR-säätimellä voidaan vaikuttaa sähkönsiirtojärjestelmissä tapahtuvien tehoheilahtelujen vaimennukseen. Työssä tarkasteltujen järjestelmien lineaarisessa analyysissä havaittiin, että vaimennus kasvoi LQR-säätimen ansioista. Tehtyjen simulaatioiden perusteella voidaan todeta, että LQR-säätimen suorituskyky on paras järjestelmän ollessa siinä toimintatilassa, jossa säädin on suunniteltu. Järjestelmän toimintapisteen ja topologian muutokset heikensivät kuitenkin säätimen suorituskykyä ja lineaarisen analyysin mukaista vaimennusta ei pystytty saavuttamaan. Pienessä neljän generaattorin järjestelmässä ongelma korostui säädetyssä järjestelmän epästabiilina käyttäytymisenä raskaassa kuormituksessa johdon menettämisen seurauksena, vaikka simulaatiotulosten perusteella LQR-säädin oli parempi ratkaisu muissa tutkituissa verkon toimintapisteissä. Suuremmassa Uuden-Englannin ja New Yorkin järjestelmän mallissa stabiilisuus säilyi kaikissa tapauksissa. Säätimen suorituskyky heikkeni selvimmin, kun muuttuneessa toimintapisteessä menetettiin johto ilman oikosulkua.

7.2 Tutkimusaiheet tulevaisuudessa

Sähkönsiirtojärjestelmien keskitettyjen säätöalgoritmien tutkimuksen tulevaisuudella on useita mahdollisia suuntia. Työn tulosten perusteella keskeisiä adaptiiviset säätimet, jotka pystyvät reagoimaan järjestelmässä tapahtuviin muutoksiin, vaativat lisää tutkimusta. Muita tulevaisuudessa tarkasteltavia tutkimusongelmia ovat muun muassa järjestelmän signaalien viiveiden mallintaminen ja niiden vaikutuksen analysointi sekä mittaussignaalien kohinan vaikutuksen analysointi.

Edellä todettiin, LQR-säätimen suorituskyvyn havaittiin olevan paras tarkasteltavien järjestelmien ollessa siinä toimintapisteessä, jossa säädin on suunniteltu. LQR-säätimen suorituskyky kuitenkin heikkeni järjestelmän toimintapisteen ja topologian muutosten seurauksena. Täten tulevaisuudessa WAMS-järjestelmää hyödyntävien keskitettyjen säädinten suunnittelussa on tarkasteltava kuinka käytettävät säätimet ja tilaestimaattorit voivat adaptoitua järjestelmässä tapahtuviin muutoksiin. Adaptiivisuuden avulla pyritään parantamaan robustisuutta ja säilyttämään säädetyssä järjestelmän stabiilisuus ja säätimen suorituskyky muutoksista huolimatta.

Tarkastellessa todellisia sähkönsiirtojärjestelmiä ja PMU-mittalaitteita, mittaussignaaleissa on aina kohinaa. Tässä työssä kaikki käytetyt mittaussignaalit oletettiin täysin kohinattomiksi. Tilaestimoinnissa käytettävä Kalman-suodin on kuitenkin

tarkoitettu käytettäväksi tilanteissa, joissa prosessi ja mittaukset sisältävät kohinaa. Kohinan parametrien tunteminen mahdollistaa suotimen virittämisen parametrien V ja W avulla.

Tässä työssä ei otettu huomioon WAMS-järjestelmien signaaleihin liittyviä viiveitä, joita käsiteltiin lyhyesti kohdassa 4.3. Viiveitä esiintyy sekä mittaus- että ohjaussignaaleissa, koska kaikki ohjattavat generaattorit ja mittalaitteet eivät voi sijaita maantieteellisesti lähellä keskitettyä säädintä. On tunnettua, että viiveiden huomioiminen ja kompensoiminen on erittäin tärkeää muodostettaessa säätimiä. Koska todellisissa sähkönsiirtojärjestelmissä viiveet ovat aina osa järjestelmää, ei esitetty reaaliaikainen säätöjärjestelmä vastaa sellaisenaan tällä hetkellä käytettävää sähköverkon säätöjärjestelmää.

Tarkastellut viat kohdistuivat sähkönsiirtojärjestelmään, mutta todellisissa järjestelmissä vika voi kohdistua myös säätimeen. Käytettävien säädinten luotettavuus ja robustisuus säätimen käyttämän WAMS-järjestelmän häiriöiden suhteen ovat tärkeitä tekijöitä. Erilaisten vikojen takia yksi tai useampia säätimen käyttämistä mittaussignaaleista voidaan menettää hetkellisesti tai pysyvästi. Säätimen halutaan pystyvän säilyttämään järjestelmä stabiilina, vaikka mittaussignaaleja menetettäisiin hetkellisesti. Tämä ongelma liittyy vahvasti tilaestimointiin, koska säätimen toiminnan kannalta on keskeistä, että tilaestimaattori pystyy tuottamaan kaikissa tilanteissa tarkat tilaestimaatit. Virheellisten tilaestimaattien perusteella muodostetut ohjaussignaalit saattavat tehdä järjestelmästä epästabiilin.

Viitteet

Aboul-Ela, M.E., Sallam, A.A., McCalley, J.D. & Fouad, A. A. 1996. Damping controller design for power system oscillations using global signals. *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 11:2. S. 767-773.

Aldeen, M. & Crusca F. 1995. Multimachine power system stabilizer design based on new LQR approach. *IEEE Proceedings on Generation, Transmission & Distribution*. Vol. 142:5. S. 494-502.

Almutairi, A. & Milanovic, J. 2009. Optimal input and output signal selection for wide-area controllers. *2009 IEEE Bucharest Power Tech*. S. 1-6.

Anderson, B.D. & Moore, J.B. 1989. *Optimal Control: Linear Quadratic Methods*, New Jersey, USA: Prentice-Hall. 791 S. 978-0136385608

Andersson, G. et al. 2005. Causes of the 2003 major grid blackouts in North America and Europe, and recommended means to improve system dynamic performance. *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 20:4. S. 1922-1928.

Bar-Shalom, Y., Li, X.R. & Kirubarajan, T. 2001. *Estimation with Application to Tracing and Navigation*. New York. USA: Wiley and Sons. 584 s. ISBN 978-047-141-655-5

Burnett, R.O. et al. 1994. Synchronized phasor measurements of a power system event. *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 9:3. S. 1643-1650.

Centeno, V., De La Ree, J., Phadke, A.G., Michel, G. & Murphy, R.J. Burnett, R.O. 1993. Adaptive out-of-step relaying using phasor measurement techniques. *IEEE Computer Applications in Power Systems*. Vol. 6:4. S. 12-17.

Chaudhuri, B., Majumder, R. & Pal, B.C. 2004. Wide-area measurement-based stabilizing control of power system considering signal transmission delay. *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 19:4. S. 1971-1979.

Chow, J.H. 1982. *Time-Scale Modeling of Dynamic Networks with Applications to Power Systems*, New York, USA: Springer. 221 s. ISBN 978-354-012-106-0.

Chow, J.H. & Rogers, G. 2008. *Power System Toolbox Version 3.0*, Matlab-lisäosan käyttöohje.

Chow, J.H. & Sanchez-Gasca, J.J. 1989. Pole-placement designs of power system stabilizers. *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 4:1. S. 271-277.

Chui, C.K. & Guanrong, C. 2008. *Kalman Filtering: with Real-Time Applications*. Berliini, Saksa: Springer-Verlag. 243 s. ISBN 978-354-087-848-3.

Concordia, C. & Ihara, S. 1982. Load representation in power system stability studies. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. Vol. PAS-101:4. S. 969-977.

- Dalela, B. & Radman, G. 2005. A Study of Multivariable Supplementary Power System Stabilizers. *Proceedings of the 37th Annual North American Power Symposium 2005*. S. 134-140
- Dotta, D., e Silva, A.S. & Decker, I.C. 2009. Wide-Area Measurements-Based Two-Level Control Design Considering Signal Transmission Delay. *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 24:1. S. 208-216.
- Doyle, J. 1978. Guaranteed margins for LQG regulators. *IEEE Transactions on Automatic Control*. Vol. 23:4. S. 756-757.
- Elovaara, J. & Haarla, L. 2011. *Sähköverkot I*. Helsinki, Suomi: Otatieto OY. 520 s. ISBN 978-951-672-360-3.
- Golnaraghi, F. & Kuo, B. C. 2009. *Automatic Control Systems*, Chichester, Iso-Britannia: Wiley and Sons. 900 s. ISBN 978-047-004-896-2.
- Grainger, J. & Stevenson W. 1994. *Power System Analysis*, New York, USA: McGraw-Hill. 787 s. ISBN 0-07-113338-0.
- Hasanovic, A. 2001. *A Simulation and Analysis Toolbox for Power Systems and Genetic Algorithm Based Damping Controller Design*.
http://wvusolar.wvu.edu:8881/exlibris/dtl/d3_1/apache_media/L2V4bGlicmlzL2R0bC9kM18xL2FwYWNoZV9tZWRpYS82MDQ1.pdf. Linkki tarkistettu 4.10.2013.
- Hashmani, A. & Erlich, I. 2010. Mode selective damping of power system electromechanical oscillations using supplementary remote signals. *IET Generation, Transmission & Distribution*. Vol. 4:10. S. 1127-1138.
- Hauer, J.F., Bhatt, N.B., Shah, K. & Kollurt, S. 2003. Performance of WAMS East in providing dynamic information for the North East blackout of August 14. *IEEE PES General Meeting*. Vol. 2. S. 1685-1690.
- IEEE Committee Report. 1981. Excitation System Models for Power System Stability Studies. *IEEE Transactions of Power Apparatus and Systems*. Vol. PAS-100. S. 494-509.
- Johansson, E., Uhlen, K., Leirbukt, A., Korba, P., Gjerde, J & Vormedal, L. 2009. Coordinating Power Oscillation Damping Control using Wide Area Measurements. *2009 PSCE Power Systems Conference and Exposition*. S. 1-8.
- Kamwa, I., Grondin, R. & Herbert, Y. 2001. Wide-area Measurement Based Stabilizing Control of Large Power Systems – A Decentralized/Hierarchical Approach. *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 16:1. S. 136-153.
- Karlsson, D., Hemmingsson, M. & Lindahl, S. 2004. Wide area system monitoring and control. *IEEE Power & Energy Magazine*. S. 68-76.

- Kirk, D.E. 2004. *Optimal Control Theory*. New York, USA: Dover Publications. 204s. ISBN 978-048-643-484-1.
- Klein, M., Le, L.X., Rogers, G., Farrokhpay, S. & Balu, N. J. 1995. H_{∞} damping controller design in large power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 10:1. S. 158-166.
- Klein, M., Rogers, G. & Kundur, P. 1991. A fundamental study of inter-area oscillations in power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 6:3. S. 914-921.
- Kundur, P. 1994. *Power System Stability and Control*. New York, USA: McGraw-Hill. 1176 s. ISBN 978-007-035-958-1.
- Kundur, P., Paserba, J., Ajarapu, V., Andersson, G., Bose, A., Canizares, C., Hatziargyriou, N., Stankovic, A., Taylor, C., Van Cutsem, T. & Vittal, V. 2004. Definition and classification of power system stability. *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 19:3. S. 1387-1401.
- Larsen, E.V. & Swann, D. A. 1981. Applying power system stabilizers - Part I, II and III. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. Vol. 100:6. S. 3017-3046.
- Leirbukt, A.B., Gjerde, J.O., Korba, P., Uhlen, K., Vormedal, L.K. & Warland, L. 2006. Wide Area Monitoring Experiences in Norway. *Power Systems Conference and Exposition*. S. 353-360.
- Ota, Y., Ukai, H., Nakamura, K., Mitani, Y., Hojo, M. & Saeki, O. 2005. PMU based power oscillation detection system and its application to Japanese longitudinal power system. *15th Power System Computation Conference*. S. 1-6.
- Pal, B. & Chaudhuri, B. 2005. *Robust Control in Power Systems*. New York, USA: Springer. 190 s. ISBN 0-387-25949-X.
- Phadke, A.G. & Thorp, J.S. 2008. *Synchronized Phasor Measurements and Their Applications*, New York, USA: Springer. 257 S. ISBN 978-038-776-535-8.
- Rogers, G. 2000. *Power System Oscillations*. Norwell, USA: Kluwer Academic Publishers. 328 s. ISBN 978-079-237-712-2.
- Rogers, G., Chow, J.H. & Vanfretti, L. 2010. *Power System Toolbox*, <http://www.ecse.rpi.edu/pst/PST.html>, Linkki tarkistettu 11.10.2013.
- Sanchez-Gasca, J.J., Miller, N.W., Kurita, A. & Horiuchi, S. 1989. Multivariable control for damping interarea oscillations in power sytems. *IEEE Control Systems Magazine*. Vol 9:1. S.28-32.
- Skogestad, S. & Postlethwaite, I. 1996. *Multivariable Feedback Control: Analysis and Design*. Chichester, Iso-Britannia: Wiley and Sons. 592 S. ISBN 978-047-001-168-3.

- Stahlhut, J.W., Browne, T.J., Heydt, G.T. & Vittal, V. 2008. Latency viewed as a stochastic process and its impact on wide area power system control signals. *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 23:1. S. 84-91.
- Taylor, C.W., Erickson, D.C., Martin, K.E., Wilson, R.E. & Venkatasubramanian, V. 2005. WACS - Wide-area stability and voltage control system: R & D and online demonstration. *Proceedings of the IEEE*. Vol. 93:5. S. 892-906.
- Uhlen, K., Elenius, S., Norheim, I., Jyrinsalo, J., Elovaara, J. & Lakervi, E. 2003. Application of linear analysis for stability improvements in the Nordic power transmission system. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*. Vol. 4. S. 2097–2103.
- Wu, H., Tsakalis K.S. & Heydt, G.T. 2004. Evaluation of time delay effects to wide-area power system stabilizer design. *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 19:4. S. 1935-1941.
- Yuxiao, X., Rongxiang, Y., Zhiyi, Z. & Wenping, H. 2009. Review of PSS Based on WAMS Suppressing Low Frequency Oscillation of Interconnected Power Grid. *ICEET '09. International Conference on Energy and Environment Technology*. S. 255-258.
- Zolotas, A., Chaudhuri, B., Jaimoukha, I. & Korba, P. 2007. A study on LQG/LTR control for damping inter-area oscillations in power systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. Vol. 15:1 S. 151-160.

Liiteluettelo

- Liite A Neljän generaattorin sähkönsiirtojärjestelmän mallin parametrit (3 sivua)
- Liite B Uuden-Englannin ja New Yorkin sähkönsiirtojärjestelmän mallin parametrit (6 sivua)
- Liite C Parametrien muunnokset (1 sivu)
- Liite D Neljän generaattorin sähkönsiirtojärjestelmän simuloinnit (3 sivua)
- Liite E Uuden-Englannin ja New Yorkin sähkönsiirtojärjestelmän simuloinnit (7 sivua)

Liite A: Neljän generaattorin sähkösiirtojärjestelmän mallin parametrit

Taulukko A.1. Generaattoreiden parametrit neljän generaattorin sähkösiirtojärjestelmässä.

Parametri	G1/G2	G3/G4
x_l (pu)	0,20	0,20
r_a (pu)	0,00	0,00
x_d (pu)	1,80	1,80
x'_d (pu)	0,30	0,30
x''_d (pu)	0,25	0,25
T'_{d0} (pu)	8,00	8,00
T''_{d0} (pu)	0,03	0,03
x_q (pu)	1,70	1,70
x'_q (pu)	0,55	0,55
x''_q (pu)	0,25	0,25
T'_{q0} (pu)	0,40	0,40
T''_{q0} (pu)	0,05	0,05
H (pu)	6,50	6,15
Q_{\max} (pu)	5,00	5,00
Q_{\min} (pu)	-1,00	-1,00
ω_0 (Hz)	60	60
P_0 (MW)	900	900
Solmu	1/2	11/12

Taulukko A.2. Johtojen parametrit neljän generaattorin sähkösiirtojärjestelmässä.

Solmusta	Solmuun	R (pu)	X (pu)	B (pu)
1	10	0,0	0,0167	0,0
2	20	0,0	0,0167	0,0
3	4	0,0	0,005	0,0
3	20	0,001	0,01	0,0175
3	101	0,011	0,110	0,1925
3	101	0,011	0,110	0,1925
10	20	0,025	0,025	0,1925
11	110	0,0	0,0167	0,0437
12	120	0,0	0,0167	0,0
13	101	0,011	0,11	0,0
13	101	0,011	0,11	0,1925
13	14	0,0	0,005	0,1925
13	120	0,001	0,01	0,0175
110	120	0,0025	0,025	0,0437

Taulukko A.3. Automaattisten jänniteensäätäjien parametrit neljän generaattorin sähkönsiirtojärjestelmässä.

Parametri	Arvo (pu)
T_R	0,01
K_A	200
T_A	0,05
T_B	0,0
T_C	0,0
E_{Max}	5,0
E_{Min}	-5,0

Taulukko A.4. Turbiinien parametrit neljän generaattorin sähkönsiirtojärjestelmässä.

Parametri	Arvo
ω_{set}	1,0
$1/r$	25,0
T_{Max}	1,0
T_s	0,1
T_c	0,5
T_3	0,0
T_4	1,25
T_5	5,0

Taulukko A.5. PSS-säätimien parametrit neljän generaattorin sähkönsiirtojärjestelmässä.

Parametri	Arvo
T_W	10,0
K	10,0
T_1	0,05
T_2	0,015
T_3	0,08
T_4	0,01

Taulukko A.6. Neljän generaattorin sähkönsiirtojärjestelmän tehonjako normaalissa kuormituksessa. Pätö- ja loistehon perusarvo 100 MW/MVA.

Solmu	 V (pu)	θ (aste)	P_G (pu)	Q_G (pu)	P_L (pu)	Q_L (pu)
1	1,03	18,5	7,00	1,61	0,00	0,00
2	1,01	8,8	7,00	1,76	0,00	0,00
3	0,9781	-6,1	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,95	-10,0	0,00	0,00	9,76	1,00
10	1,0103	12,1	0,00	0,00	0,00	0,00
11	1,03	-6,8	7,16	1,49	0,00	0,00
12	1,01	-16,9	7,00	1,39	0,00	0,00
13	0,9899	-31,8	0,00	0,00	0,00	0,00
14	0,95	-35,0	0,00	0,00	17,65	1,00
20	0,9876	2,1	0,00	0,00	0,00	0,00
101	1,00	-19,3	0,00	0,00	0,00	0,00
110	1,0125	-13,4	0,00	0,00	0,00	0,00
120	0,9938	-23,6	0,00	0,00	0,00	0,00

Liite B: Uuden-Englannin ja New Yorkin sähkösiirtojärjestelmän mallin parametrit

Taulukko B.1. Generaattoreiden 1–8 parametrit Uuden-Englannin ja New Yorkin sähkösiirtojärjestelmässä.

Parametri	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
x_l (pu)	0,0030	0,0350	0,0304	0,0295	0,0270	0,0224	0,0332	0,0280
r_a (pu)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
x_d (pu)	0,969	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800
x'_d (pu)	0,24800	0,42529	0,38309	0,29954	0,36000	0,35433	0,29898	0,35379
x''_d (pu)	0,147	0,30508	0,32465	0,24046	0,27273	0,28346	0,24407	0,27931
T'_{d0} (pu)	12,60	6,56	5,70	5,69	5,40	7,30	5,66	6,70
T''_{d0} (pu)	0,045	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,05
x_q (pu)	0,6000	1,7207	1,7098	1,7725	1,6909	1,7079	1,7917	1,800
x'_q (pu)	0,2500	0,3661	0,36072	0,27481	0,32727	0,31890	0,27458	0,31034
x''_q (pu)	0,00	0,30508	0,32465	0,24046	0,27273	0,28346	0,24407	0,27931
T'_{q0} (pu)	0,035	1,500	1,500	1,500	0,440	0,400	1,500	0,410
T''_{q0} (pu)	0,000	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,045
H (pu)	3,40	4,9494	4,9623	4,1629	4,7667	4,9107	4,3267	3,915
P_0 (MW)	300	800	800	800	700	900	800	800
ω_0 (Hz)	60	60	60	60	60	60	60	60
Solmu	53	54	55	56	57	58	59	60

Taulukko B.2. Generaattoreiden 9–16 parametrit Uuden-Englannin ja New Yorkin sähkösiirtojärjestelmässä.

Parametri	G9	G10	G11	G12	G13	G14	G15	G16
x_l (pu)	0,0298	0,0199	0,0103	0,0220	0,0030	0,0017	0,0017	0,0041
r_a (pu)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
x_d (pu)	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800
x'_d (pu)	0,48718	0,48675	0,25312	0,55248	0,33446	0,285	0,285	0,35899
x''_d (pu)	0,38462	0,42604	0,16875	0,44554	0,24324	0,23	0,23	0,27809
T'_{d0} (pu)	4,79	9,37	4,10	7,40	5,90	4,10	4,10	7,80
T''_{d0} (pu)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
x_q (pu)	1,7521	1,2249	1,7297	1,6931	1,7392	1,73	1,73	1,6888
x'_q (pu)	0,42735	0,47929	0,21094	0,49901	0,30405	0,25	0,25	0,30337
x''_q (pu)	0,38462	0,42604	0,16875	0,44554	0,24324	0,23	0,23	0,27809
T'_{q0} (pu)	1,96	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
T''_{q0} (pu)	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035
H (pu)	4,0365	2,9106	2,0053	5,1791	4,0782	3,0000	3,0000	4,4500
P_0 (MW)	1000	1200	1600	1900	12000	10000	10000	11000
ω_0 (Hz)	60	60	60	60	60	60	60	60
Solmu	61	62	63	64	65	66	67	68

Taulukko B.3. Johtojen parametrit Uuden-Englannin ja New Yorkin sähkönsiirtojärjestelmässä.

Solmusta	Solmuun	R (pu)	X (pu)	B (pu)
1	2	0,0035	0,0411	0,6987
1	30	0,0008	0,0074	0,4800
2	3	0,0013	0,0151	0,2572
2	25	0,0070	0,0086	0,1460
2	53	0,0000	0,0181	0,0000
3	4	0,0013	0,0213	0,2214
3	18	0,0011	0,0133	0,2138
4	5	0,0008	0,0128	0,1342
4	14	0,0008	0,0129	0,1382
5	6	0,0002	0,0026	0,0434
5	8	0,0008	0,0112	0,1476
6	7	0,0006	0,0092	0,1130
6	11	0,0007	0,0082	0,1389
6	54	0,0000	0,0250	0,0000
7	8	0,0004	0,0046	0,0780
8	9	0,0023	0,0363	0,3804
9	30	0,0019	0,0183	0,2900
10	11	0,0004	0,0043	0,0729
10	13	0,0004	0,0043	0,0729
10	55	0,0000	0,0200	0,0000
12	11	0,0016	0,0435	0,0000
12	13	0,0016	0,0435	0,0000
13	14	0,0009	0,0101	0,1723
14	15	0,0018	0,0217	0,3660
15	16	0,0009	0,0094	0,1710
16	17	0,0007	0,0089	0,1342
16	19	0,0016	0,0195	0,3040
16	21	0,0008	0,0135	0,2548
16	24	0,0003	0,0059	0,0680
17	18	0,0007	0,0082	0,1319
17	27	0,0013	0,0173	0,3216
19	20	0,0007	0,0138	0,0000
19	56	0,0007	0,0142	0,0000
20	57	0,0009	0,0180	0,0000
21	22	0,0008	0,0140	0,2565
22	23	0,0006	0,0096	0,1846
22	58	0,0000	0,0143	0,0000
23	24	0,0022	0,0350	0,3610
23	59	0,0005	0,0272	0,0000
25	26	0,0032	0,0323	0,5310
25	60	0,0006	0,0232	0,0000
26	27	0,0014	0,0147	0,2396
26	28	0,0043	0,0474	0,7802
26	29	0,0057	0,0625	1,0290

28	29	0,0014	0,0151	0,2490
29	61	0,0008	0,0156	0,0000
9	30	0,0019	0,0183	0,2900
9	36	0,0022	0,0196	0,3400
9	36	0,0022	0,0196	0,3400
36	37	0,0005	0,0045	0,3200
34	36	0,0033	0,0111	1,4500
35	34	0,0001	0,0074	0,0000
33	34	0,0011	0,0157	0,2020
32	33	0,0008	0,0099	0,1680
30	31	0,0013	0,0187	0,3330
30	32	0,0024	0,0288	0,4880
1	31	0,0016	0,0163	0,2500
31	38	0,0011	0,0147	0,2470
33	38	0,0036	0,0444	0,6930
38	46	0,0022	0,0284	0,4300
46	49	0,0018	0,0274	0,2700
1	47	0,0013	0,0188	1,3100
47	48	0,0025	0,0268	0,4000
47	48	0,0025	0,0268	0,4000
48	40	0,0020	0,0220	1,2800
35	45	0,0007	0,0175	1,3900
37	43	0,0005	0,0276	0,0000
43	44	0,0001	0,0011	0,0000
44	45	0,0025	0,0730	0,0000
39	44	0,0000	0,0411	0,0000
39	45	0,0000	0,0839	0,0000
45	51	0,0004	0,0105	0,7200
50	52	0,0012	0,0288	2,0600
50	51	0,0009	0,0221	1,6200
49	52	0,0076	0,1141	1,1600
52	42	0,0040	0,0600	2,2500
42	41	0,0040	0,0600	2,2500
41	40	0,0060	0,0840	3,1500
31	62	0,0000	0,0260	0,0000
32	63	0,0000	0,0130	0,0000
36	64	0,0000	0,0075	0,0000
37	65	0,0000	0,0033	0,0000
41	66	0,0000	0,0015	0,0000
42	67	0,0000	0,0015	0,0000
52	68	0,0000	0,0030	0,0000
1	27	0,0320	0,3200	0,4100

Taulukko B.4. Automaattisten jännitteensäätäjien parametrit Uuden-Englannin ja New Yorkin sähkönsiirtojärjestelmässä.

Parametri	Arvo (pu)
T_R	0,0
K_A	100
T_A	0,01
T_B	0,0
T_C	0,0
E_{Max}	5,0
E_{Min}	-5,0

Taulukko B.5. Generaattoreiden 1–6 PSS-säätimien parametrit Uuden-Englannin ja New Yorkin sähkönsiirtojärjestelmässä.

Parametri	G1	G2	G3	G4	G5	G6
T_W	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
K	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
T_1	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08	0,10
T_2	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
T_3	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,10
T_4	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

Taulukko B.6. Generaattoreiden 7–12 PSS-säätimien parametrit Uuden-Englannin ja New Yorkin sähkönsiirtojärjestelmässä.

Parametri	G7	G8	G9	G10	G11	G12
T_W	10,0	10,0	10,0	10,0	5,0	10,0
K	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
T_1	0,08	0,08	0,08	0,10	0,08	0,10
T_2	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02
T_3	0,08	0,08	0,05	0,10	0,05	0,10
T_4	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02

Taulukko B.7. Uuden-Englannin ja New Yorkin sähkönsiirtojärjestelmän tehonjako normaalissa kuormituksessa. Pätö- ja loistehon perusarvo 100 MW/MVA.

Solmu	V (pu)	θ (aste)	P_G (pu)	Q_G (pu)	P_L (pu)	Q_L (pu)
1	1,0591	6,6	0,00	0,00	2,53	1,19
2	1,0516	8,4	0,00	0,00	0,00	0,00
3	1,0328	5,4	0,00	0,00	3,22	0,02
4	1,0059	4,3	0,00	0,00	5,00	1,84
5	1,0072	5,3	0,00	0,00	0,00	0,00
6	1,0093	5,9	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,9995	3,6	0,00	0,00	2,34	0,84
8	0,9990	3,1	0,00	0,00	5,22	1,77
9	1,0391	2,6	0,00	0,00	1,04	1,25
10	1,0184	8,5	0,00	0,00	0,00	0,00
11	1,0141	7,6	0,00	0,00	0,00	0,00
12	1,0553	7,6	0,00	0,00	0,09	0,88
13	1,0157	7,8	0,00	0,00	0,00	0,00
14	1,0134	6,2	0,00	0,00	0,00	0,00
15	1,0171	6,1	0,00	0,00	3,20	1,53
16	1,0334	7,7	0,00	0,00	3,29	0,32
17	1,0365	6,6	0,00	0,00	0,00	0,00
18	1,0338	5,7	0,00	0,00	1,58	0,30
19	1,0501	12,3	0,00	0,00	0,00	0,00
20	0,9904	10,8	0,00	0,00	6,80	1,03
21	1,0325	10,3	0,00	0,00	2,74	1,15
22	1,0501	15,0	0,00	0,00	0,00	0,00
23	1,0450	14,7	0,00	0,00	2,48	0,85
24	1,0386	7,9	0,00	0,00	3,09	-0,92
25	1,0598	9,7	0,00	0,00	2,24	0,47
26	1,0561	8,2	0,00	0,00	1,39	0,17
27	1,0434	6,3	0,00	0,00	2,81	0,76
28	1,0520	11,3	0,00	0,00	2,06	0,28
29	1,0509	14,0	0,00	0,00	2,84	0,27
30	1,0536	6,1	0,00	0,00	0,00	0,00
31	1,0573	8,6	0,00	0,00	0,00	0,00
32	1,0511	11,0	0,00	0,00	0,00	0,00
33	1,0563	7,5	0,00	0,00	1,12	0,00
34	1,0652	2,5	0,00	0,00	0,00	0,00
35	1,0139	2,5	0,00	0,00	0,00	0,00
36	1,0423	-0,8	0,00	0,00	1,02	-0,19
37	1,0290	-6,8	0,00	0,00	60,00	3,00
38	1,0558	8,7	0,00	0,00	0,00	0,00
39	1,0057	8,4	0,00	0,00	2,67	0,13
40	1,0677	15,2	0,00	0,00	0,66	0,24
41	0,9994	44,5	0,00	0,00	10,00	2,50
42	0,9991	38,9	0,00	0,00	11,50	2,50
43	1,0147	-7,6	0,00	0,00	0,00	0,00
44	1,0140	-7,6	0,00	0,00	2,68	0,05

45	1,0178	2,5	0,00	0,00	2,08	0,21
46	1,0324	9,6	0,00	0,00	1,51	0,29
47	1,0738	7,4	0,00	0,00	2,03	0,33
48	1,0765	9,3	0,00	0,00	2,41	0,02
49	1,0117	12,9	0,00	0,00	1,64	0,29
50	1,0119	19,3	0,00	0,00	1,00	-1,47
51	1,0221	6,5	0,00	0,00	3,37	-1,22
52	0,9035	38,6	0,00	0,00	24,70	1,23
53	1,0450	10,9	2,50	1,15	0,00	0,00
54	0,9800	14,4	5,45	1,84	0,00	0,00
55	0,9830	16,4	6,50	1,99	0,00	0,00
56	0,9970	17,5	6,32	1,07	0,00	0,00
57	1,0110	16,0	5,05	1,62	0,00	0,00
58	1,0500	20,3	7,00	2,20	0,00	0,00
59	1,0630	22,6	5,60	0,99	0,00	0,00
60	1,0300	16,5	5,40	0,00	0,00	0,00
61	1,0250	20,8	8,00	0,05	0,00	0,00
62	1,0100	15,9	5,00	0,06	0,00	0,00
63	1,0000	18,3	10,00	-0,17	0,00	0,00
64	1,0156	4,9	13,50	2,49	0,00	0,00
65	1,0110	0	35,91	8,75	0,00	0,00
66	1,0000	46,0	17,85	0,62	0,00	0,00
67	1,0000	39,8	10,00	0,67	0,00	0,00
68	1,0000	45,5	40,00	4,60	0,00	0,00

Liite C: Parametrien muunnokset

Esitetyissä taulukoissa generaattoreita kuvaavat parametrit ovat esitetty standardimuodossa. Taulukoissa A.1, B.1 ja B.2 esitetyistä standardimuotoisista generaattoreiden parametreista voidaan ratkaista luvussa 3 tehdyssä tarkastelussa käytettävät generaattoreiden parametrit yhtälöiden (C.1) – (C.8) mukaisesti. (Kundur, 1994)

$$L_{fd} = \frac{x_l - x'_d}{x'_d - x_d} (x_d - x_l) \quad (C.1)$$

$$L_{1d} = \frac{(x_l - x''_d)(x_d - x_l)L_{fd}}{(x''_d - x_l)(x_d - x_l) + (x''_d - x_d)L_{fd}} \quad (C.2)$$

$$L_{1q} = \frac{x_l - x'_q}{x'_q - x_q} (x_q - x_l) \quad (C.3)$$

$$L_{2q} = \frac{(x_l - x''_q)(x_q - x_l)L_{1q}}{(x''_q - x_l)(x_q - x_l) + (x''_q - x_q)L_{1q}} \quad (C.4)$$

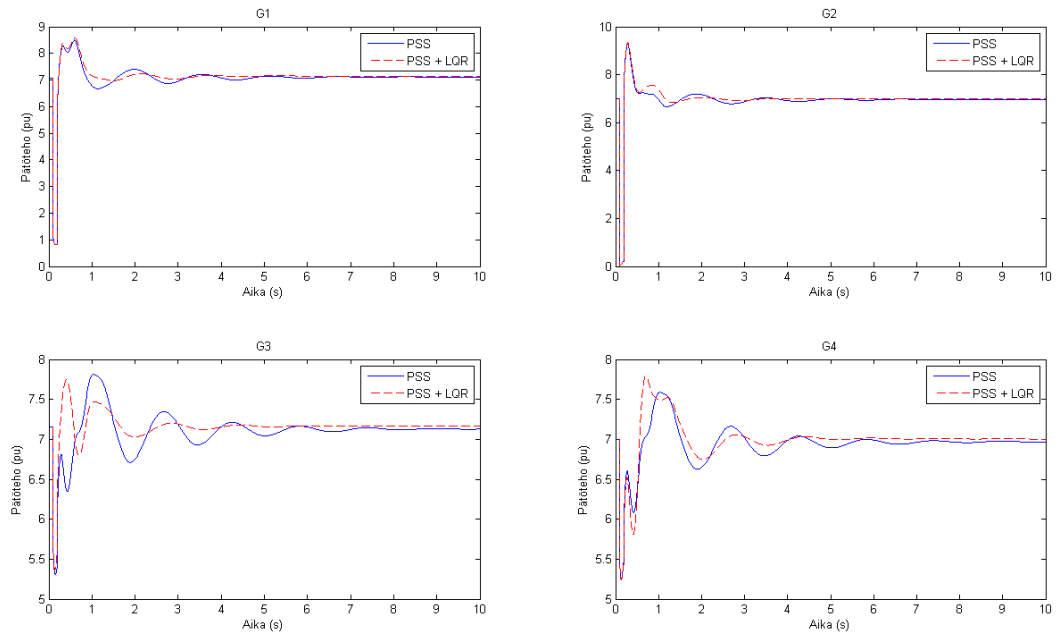
$$R_{fd} = \frac{x_d - x_l + L_{fd}}{\omega_0 T_{d0}} \quad (C.5)$$

$$R_{1d} = \frac{1}{\omega_0 T'_{d0}} \left(L_{1d} + (x_d - x_l) \frac{L_{fd}}{x_d - x_l + L_{fd}} \right) \quad (C.6)$$

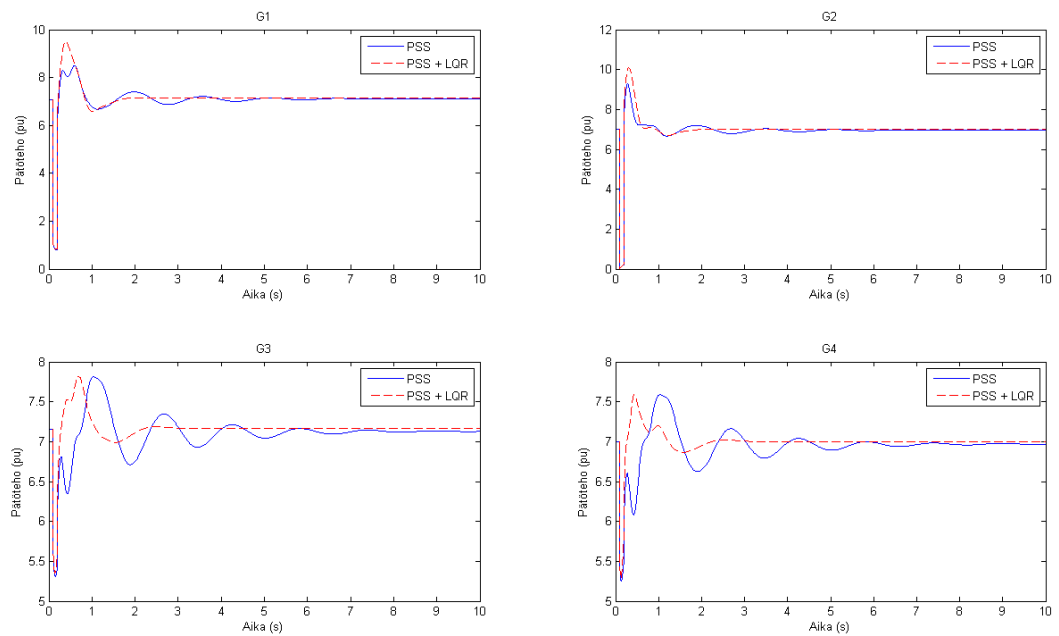
$$R_{1q} = \frac{x_d - x_l + L_{1q}}{\omega_0 T_{q0}} \quad (C.7)$$

$$R_{2q} = \frac{1}{\omega_0 T'_{q0}} \left(L_{1q} + (x_q - x_l) \frac{L_{1q}}{x_q - x_l + L_{1q}} \right) \quad (C.8)$$

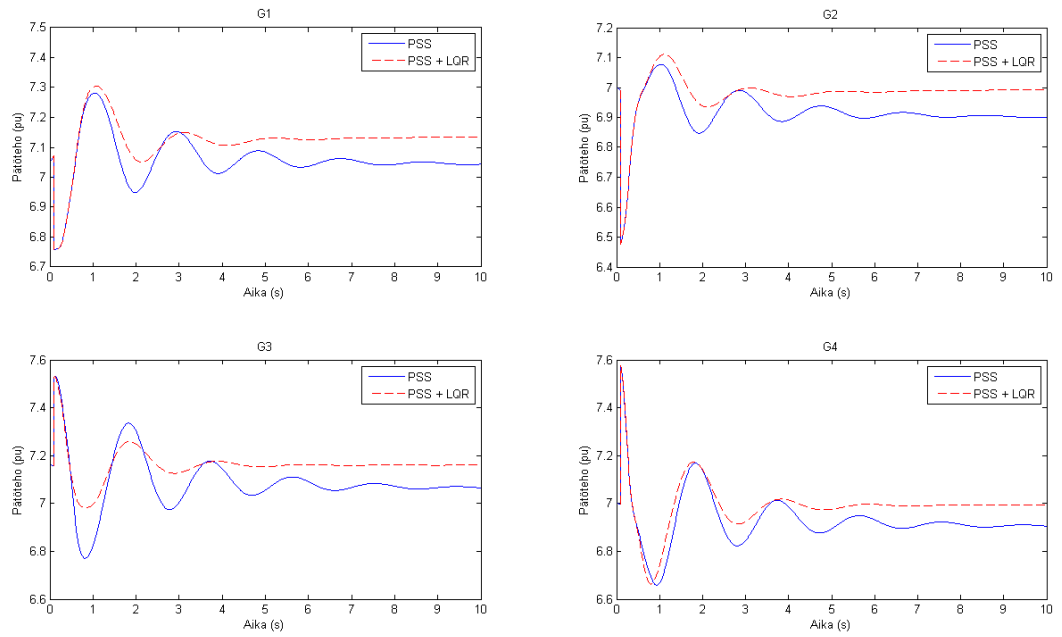
Liite D: Neljän generaattorin järjestelmän mallin simuloinnit



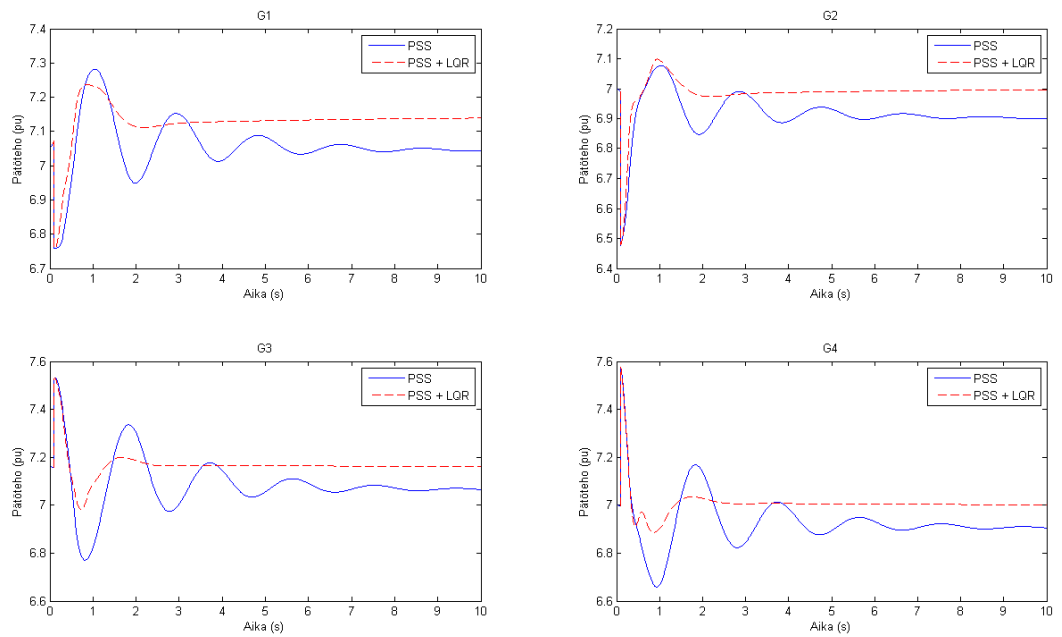
Kuva D.1. Generaattoreiden tuottama pätöteho oikosulun seurauksena normaalissa kuormituksessa. Säädettävä generaattori: 3.



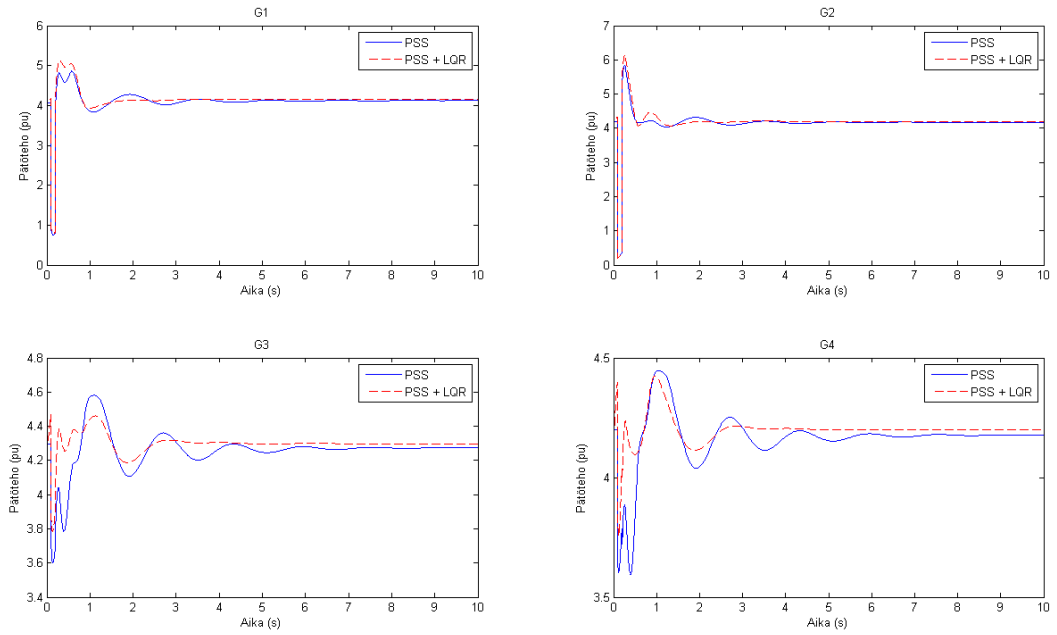
Kuva D.2. Generaattoreiden tuottama pätöteho oikosulun seurauksena normaalissa kuormituksessa. Säädettävät generaattorit: 1–4.



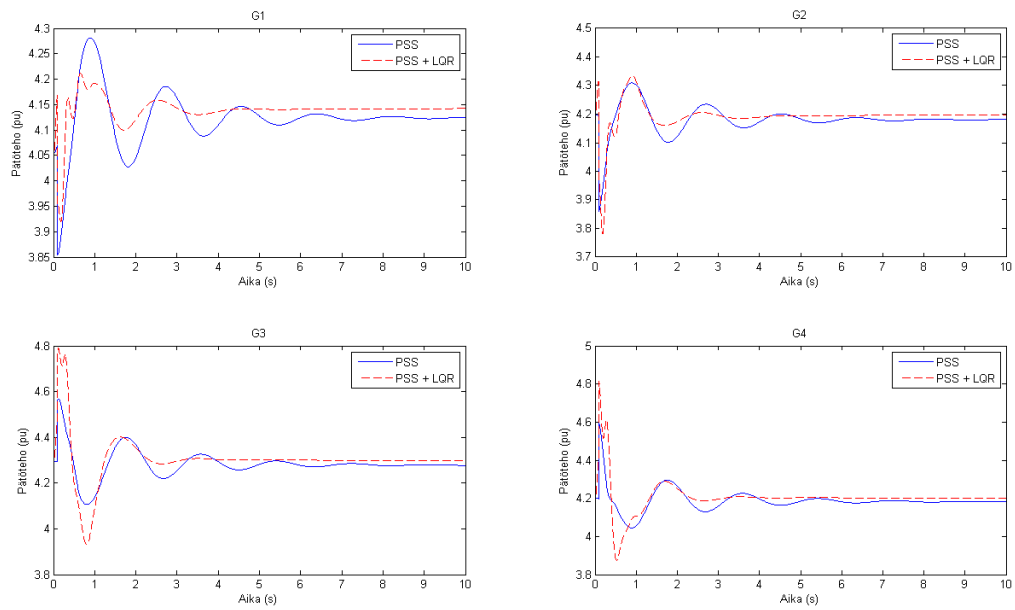
Kuva D.3. Generaattoreiden tuottama pätöteho johdon menettämisen seurauksena normaalissa kuormituksessa. Säädettävä generaattori: 3.



Kuva D.4. Generaattoreiden tuottama pätöteho johdon menettämisen seurauksena normaalissa kuormituksessa. Säädettävät generaattorit: 1–4.

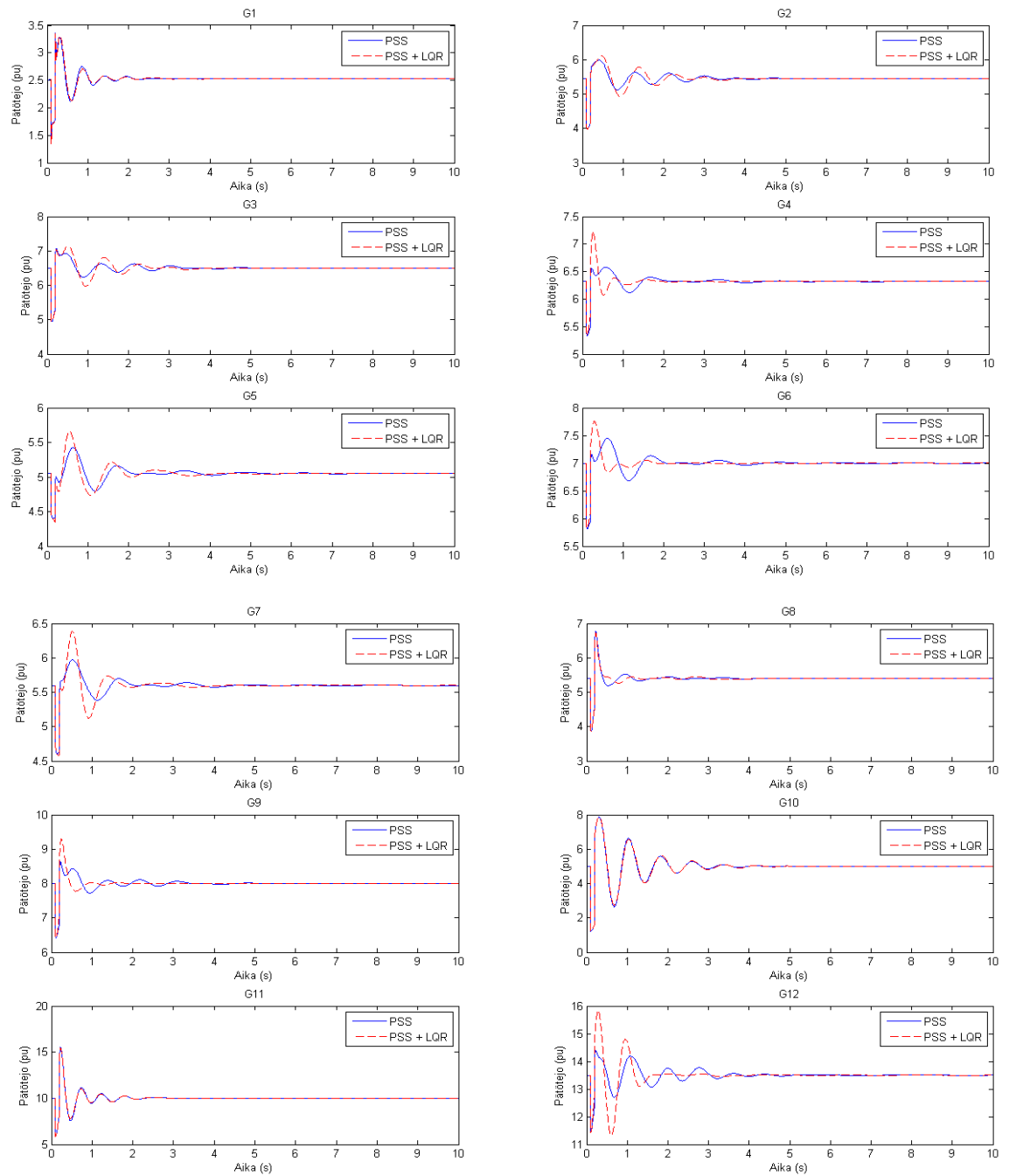


Kuva D.5. Generaattoreiden tuottama pätöteho oikosulun seurauksena kevyessä kuormituksessa. Säädetävät generaattorit: 1–4.

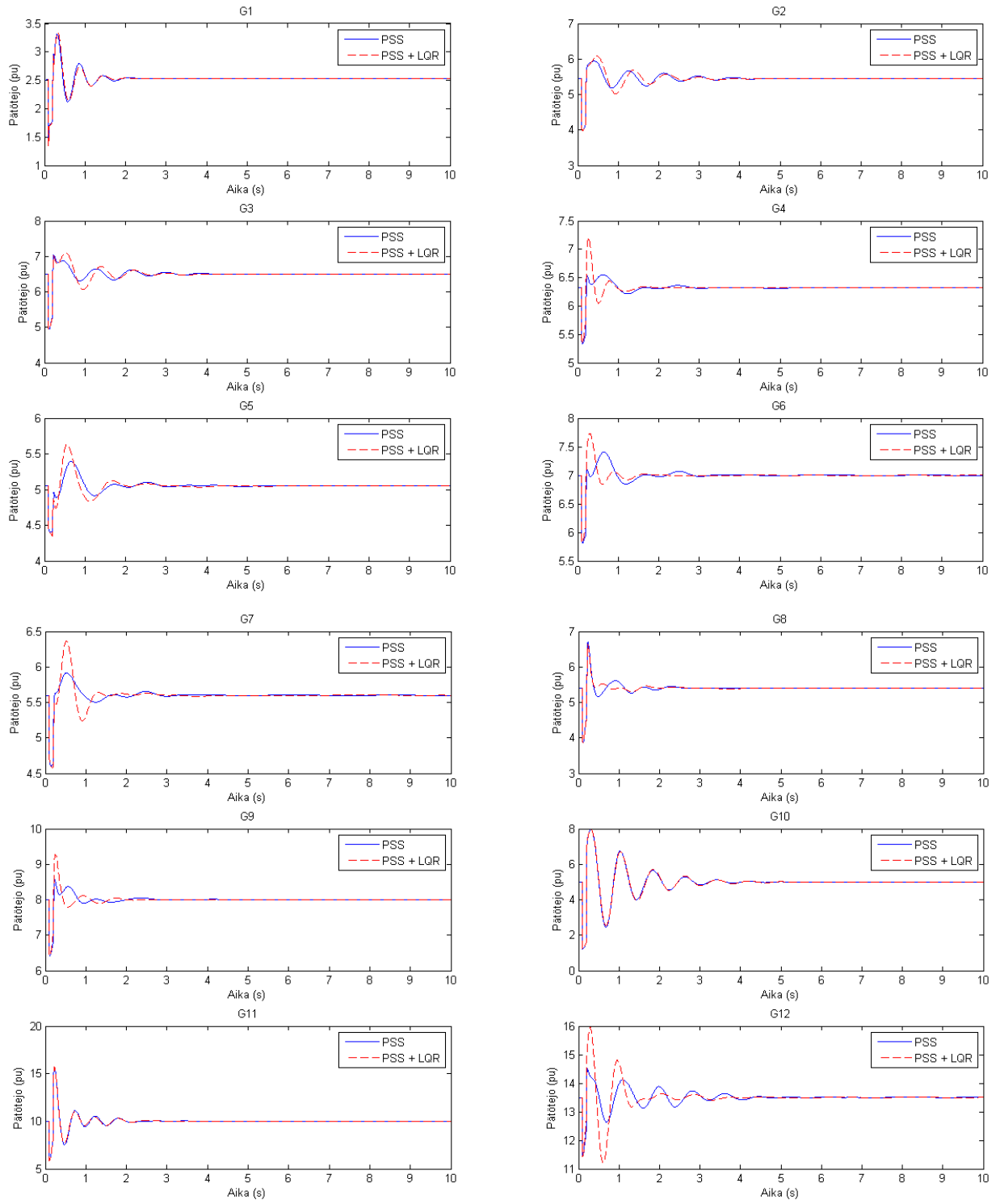


Kuva D.6. Generaattoreiden tuottama pätöteho johdon menettämisen seurauksena kevyessä kuormituksessa. Säädetävät generaattorit: 1–4.

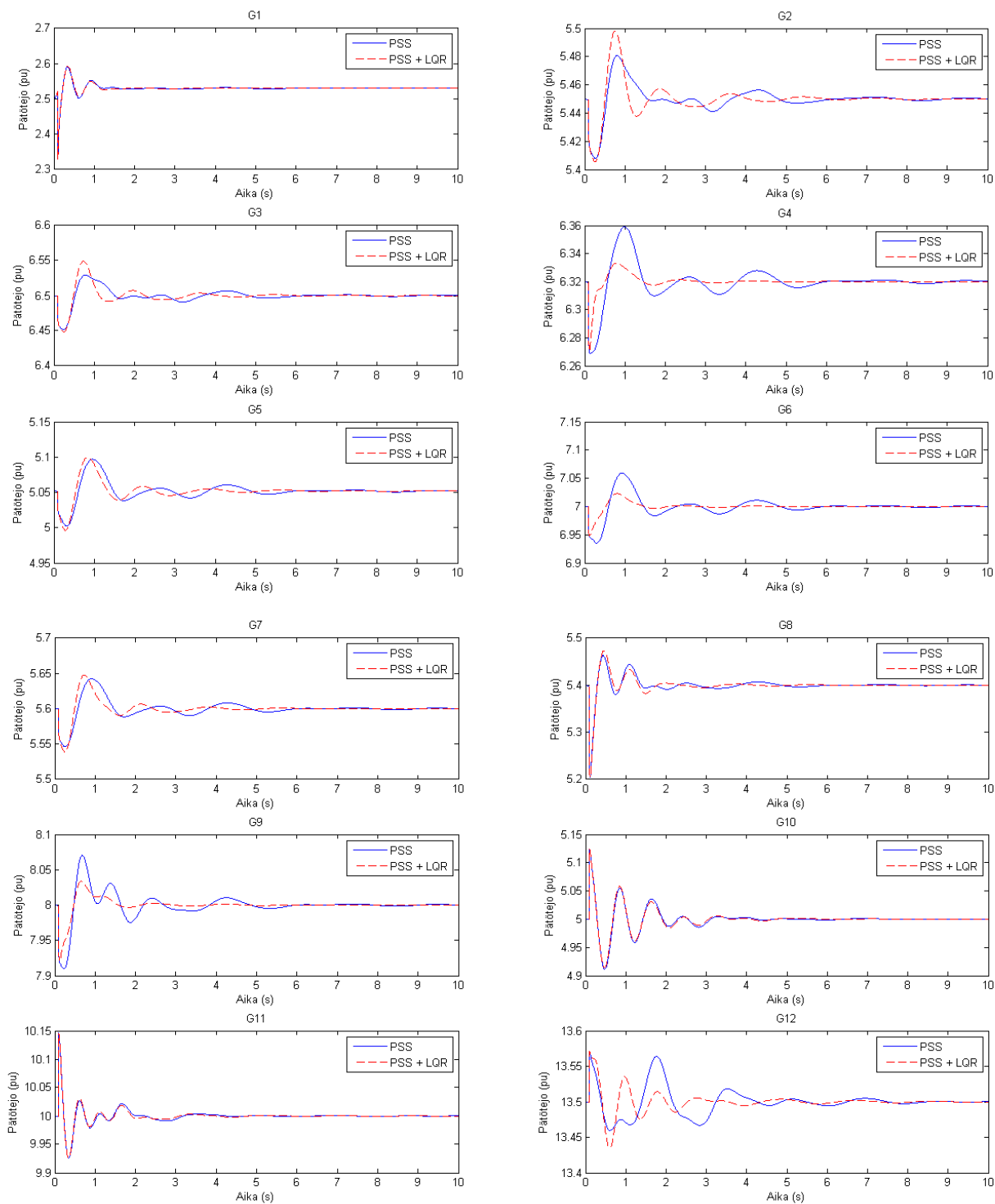
Liite E: Uuden-Englannin ja New Yorkin sähkösiirtojärjestelmän mallin simuloinnit



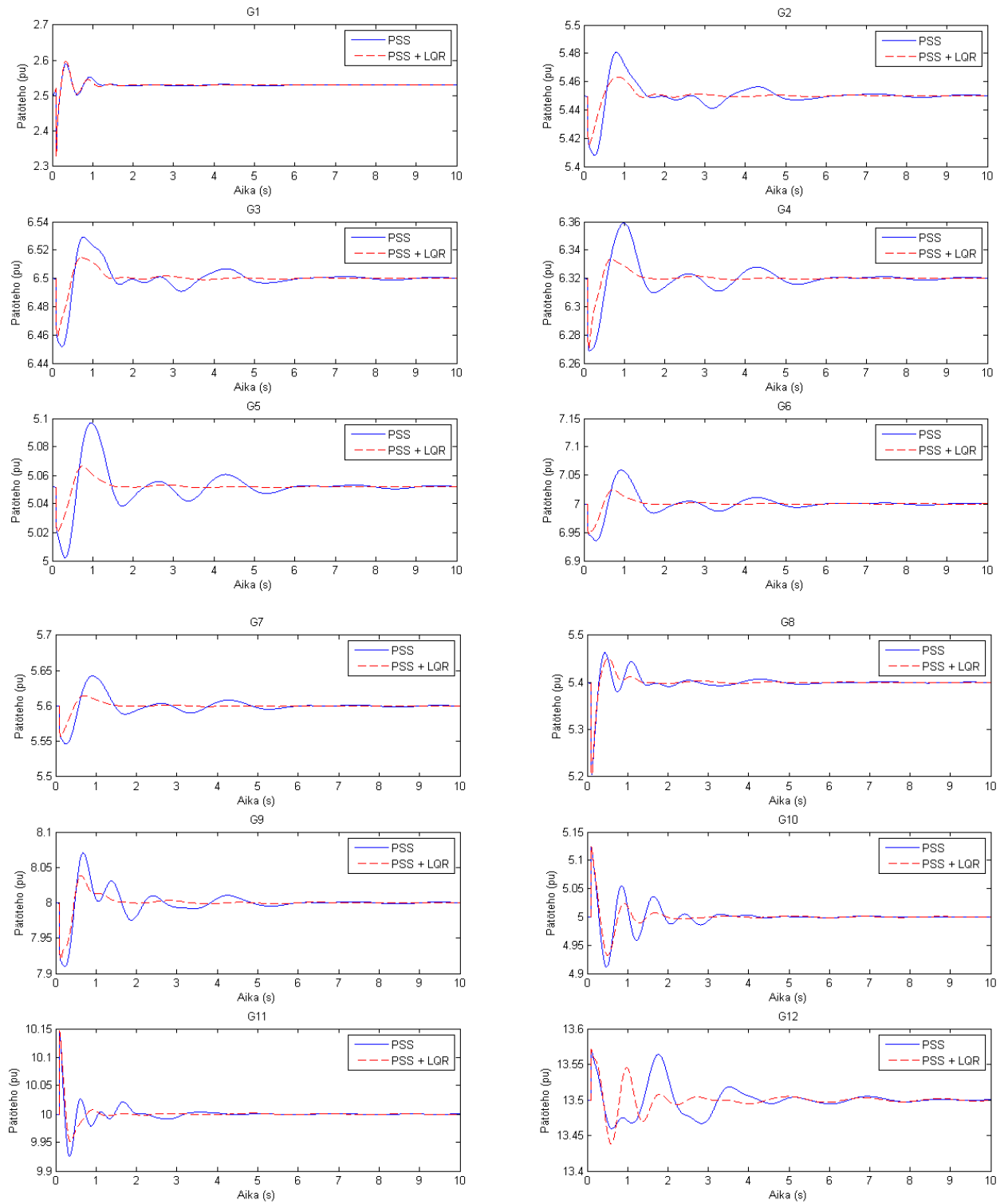
Kuva E.1. Generaattoreiden 1–12 tuottama pätöteho oikosulun seurauksena normaalissa kuormituksessa. Säädettävät generaattorit: 4, 6, 9 ja 12.



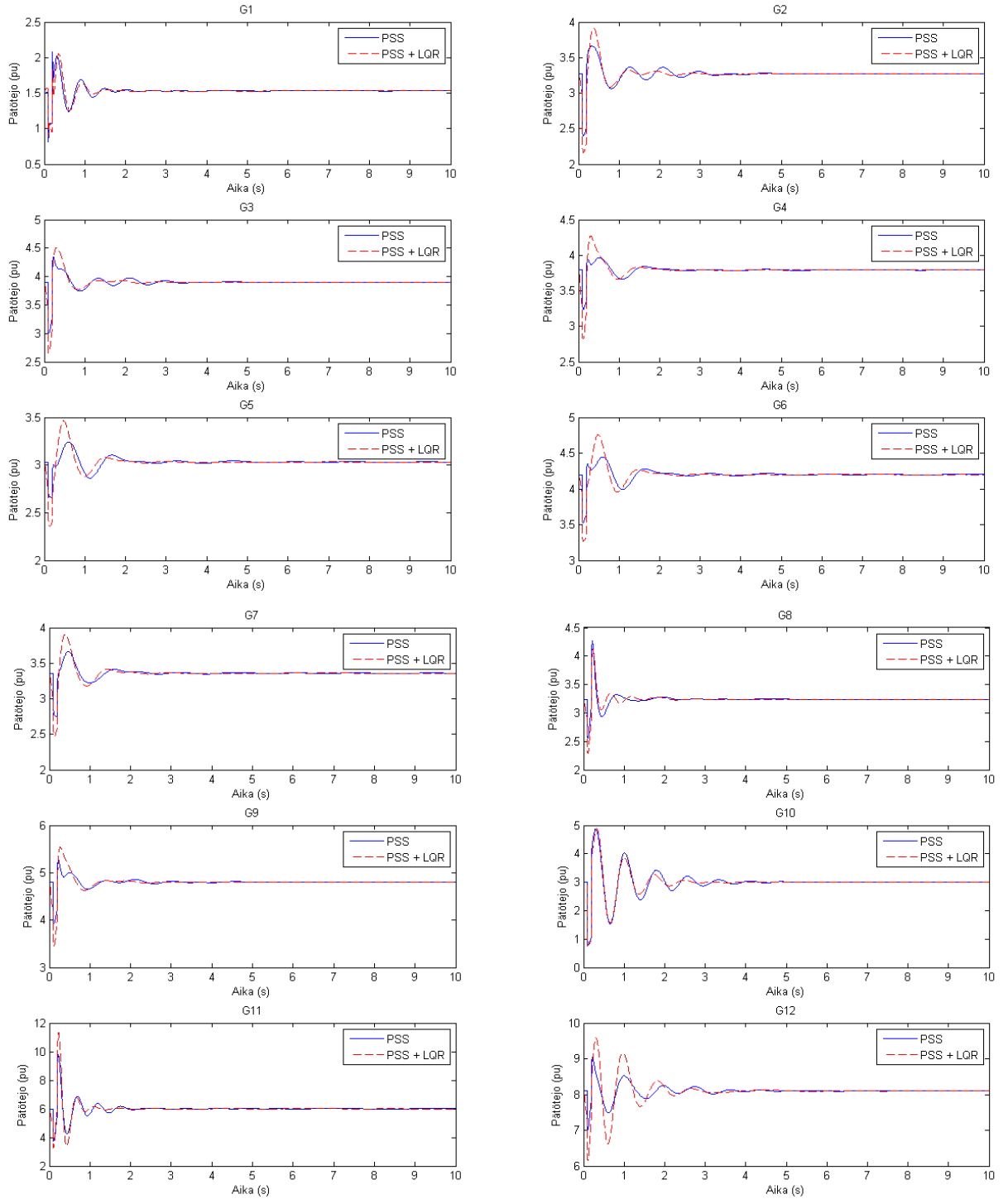
Kuva E.2. Generaattoreiden 1–12 tuottama pätöteho oikosulun ja johdon menettämisen seurauksena normaalissa kuormituksessa. Säädettyvät generaattorit: 4, 6, 9 ja 12.



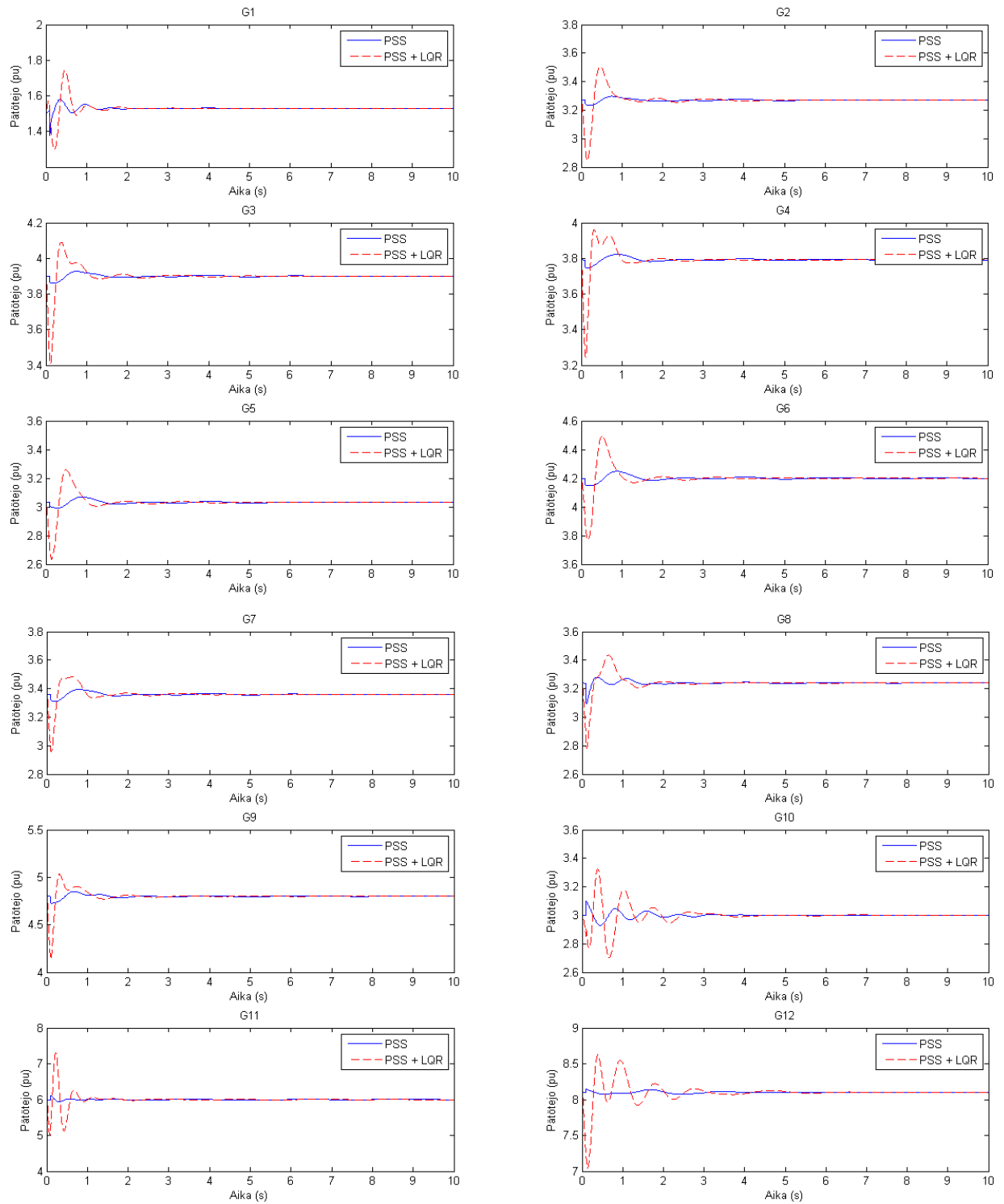
Kuva E.3. Generaattoreiden 1–12 tuottama pätöteho johdon menettämisen seurauksena normaalissa kuormituksessa. Säädettyvät generaattorit: 4, 6, 9 ja 12.



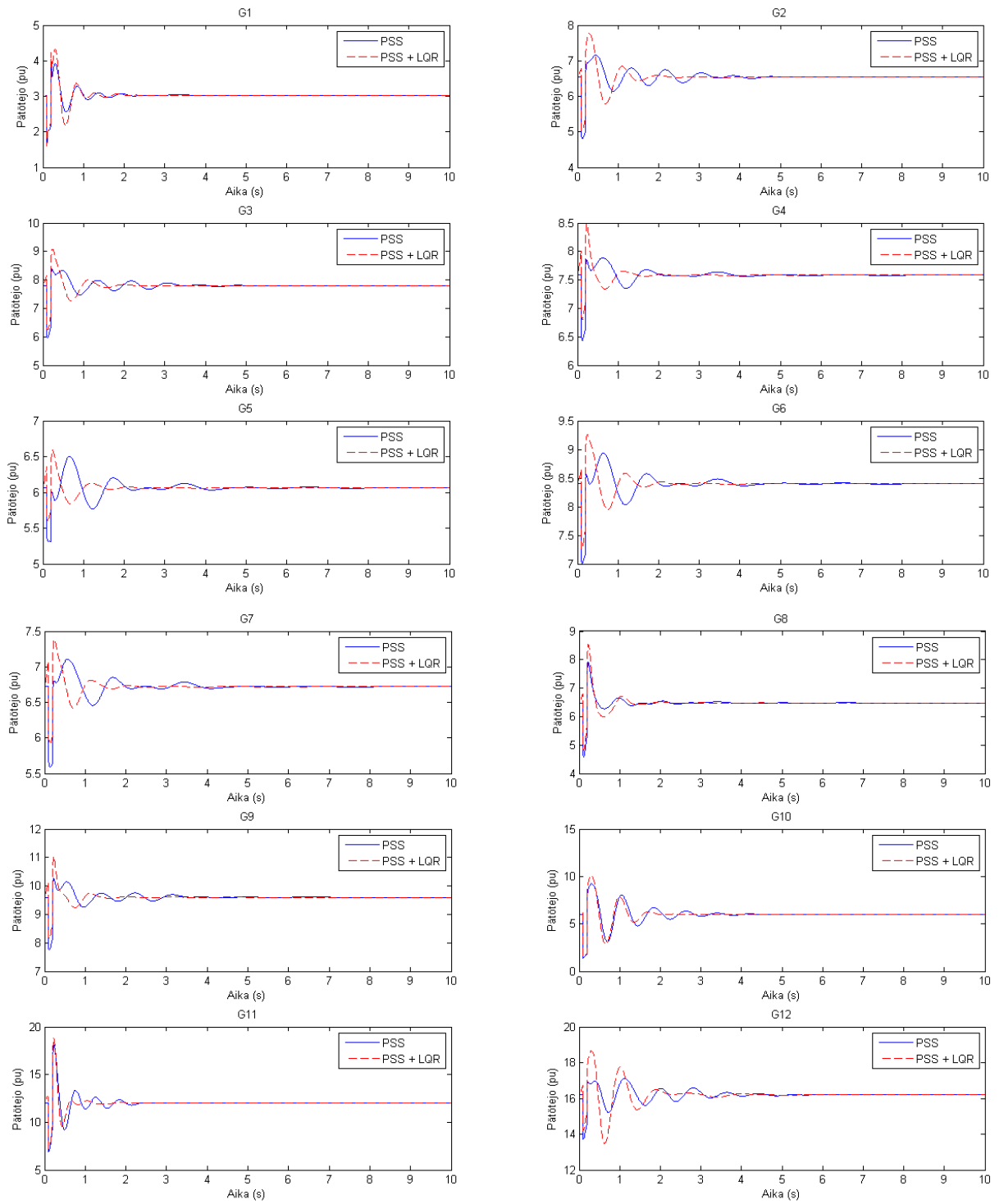
Kuva E.4. Generaattoreiden 1–12 tuottama pätöteho johdon menettämisen seurauksena normaalissa kuormituksessa. Säädettävät generaattorit: 1–12.



Kuva E.5. Generaattoreiden 1–12 tuottama pätöteho oikosulun seurauksena kevyessä kuormituksessa. Säädettävät generaattorit: 1–12.



Kuva E.6. Generaattoreiden 1–12 tuottama pötöteho johdon menettämisen seurauksena kevyessä kuormituksessa. Säädettävät generaattorit: 1–12.



Kuva E.7. Generaattoreiden 1–12 tuottama pätöteho oikosulun seurauksena raskaassa kuormituksessa. Säädettävät generaattorit: 1–12.